VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

Н. Я. Бауман
М. И. Яковлев
И. Н. Свечков

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Н. Я. БАУМАН, М. И. ЯКОВЛЕВ, И. Н. СВЕЧКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов, обучающихся по специальности «Турбиностроение»

Москва
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1973

Б 29
УДК (621.165 + 621.438).002.2

Бауман Н. Я., Яковлев М. И., Свечков И. Н. Технология производства паровых и газовых турбин. М., «Машиностроение», 1973, 464 с.

В учебнике изложены основы технологии производства паровых и газовых турбин; подробно освещена технология механической обработки типовых деталей и сборки турбин; рассмотрены вопросы техники безопасности работ и технологичности конструкций турбин; отражен современный опыт отечественного турбиностроения.

Учебник может быть также полезен технологам и другим инженерно-техническим работникам турбиностроительных заводов.

Табл. 34, ил. 262, список лит. 20 назв.

Редактор инж. *В. И. Тихонов*

Рецензент инж. *И. И. Лобанов*

Б $\frac{3131-153}{038(01)-73}$ 153—73

© Издательство «Машиностроение», 1973 г.

Николай Яковлевич БАУМАН,
Михаил Иванович ЯКОВЛЕВ,
Израиль Наумович СВЕЧКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Редактор издательства Б. П. Святов

Технический редактор *Л. А. Макарова*

Корректор *А. А. Снастина*

Художник *С. Г. Абелин*

Сдано в набор 3/IV—1973 г. Подписано к печати 23/XI—1973 г.
Т-17884. Формат 60×90/16
Бумага № 2. Печ. л. 29,0. Уч.-изд. л. 29,85. Тир. 5000
Зак. № 899 Цена 1 р. 25 к.

Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3.
Набрано в экспериментальной типографии ВНИИ полиграфии
Государственного Комитета Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва, К-51, Цветной бульвар, 30
Отпечатано в Московской типографии № 8 «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Хохловский пер., 7. Зак. 3909.

Б 29
УДК (621.165 + 621.438).002.2

Бауман Н. Я., Яковлев М. И., Свечков И. Н. Технология производства паровых и газовых турбин. М., «Машиностроение», 1973, 464 с.

В учебнике изложены основы технологии производства паровых и газовых турбин; подробно освещена технология механической обработки типовых деталей и сборки турбин; рассмотрены вопросы техники безопасности работ и технологичности конструкций турбин; отражен современный опыт отечественного турбиностроения.

Учебник может быть также полезен технологам и другим инженерно-техническим работникам турбиностроительных заводов.

Табл. 34, ил. 262, список лит. 20 назв.

Редактор инж. *В. И. Тихонов*

Рецензент инж. *И. И. Лобанов*

Б $\frac{3131-153}{038(01)-73}$ 153—73

© Издательство «Машиностроение», 1973 г.

Николай Яковлевич БАУМАН,
Михаил Иванович ЯКОВЛЕВ,
Израиль Наумович СВЕЧКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Редактор издательства Б. П. Святов

Технический редактор *Л. А. Макарова*

Корректор *А. А. Снастина*

Художник *С. Г. Абелин*

Сдано в набор 3/IV—1973 г. Подписано к печати 23/XI—1973 г.
Т-17884. Формат 60×90/16
Бумага № 2. Печ. л. 29,0. Уч.-изд. л. 29,85. Тир. 5000
Зак. № 899 Цена 1 р. 25 к.

Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3.
Набрано в экспериментальной типографии ВНИИ полиграфии
Государственного Комитета Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва, К-51, Цветной бульвар, 30
Отпечатано в Московской типографии № 8 «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Хохловский пер., 7. Зак. 3909.

ВВЕДЕНИЕ

Пионером отечественного энергетического турбиностроения является Санкт-Петербургский металлический завод, основанный в 1857 г.— ныне Ленинградский металлический завод им. XXII съезда КПСС (ЛМЗ). Впервые к организации турбинного производства завод приступил в 1904 г. и с этой целью приобрел право на изготовление турбин конструкции французской фирмы Рато. Первая паровая турбина по ее чертежам была изготовлена заводом в 1907 г. После изготовления эта турбина была установлена на заводской электростанции, где и работала под наблюдением заводских работников. Таким образом, на ее создании и эксплуатации учились заводские инженеры, техники и рабочие.

Зарождение отечественного турбиностроения проходило в трудной конкурентной борьбе с иностранным капиталом, имевшим значительное влияние на экономику дореволюционной России.

Владельцы крупных зарубежных фирм, боясь конкуренции, стремились всячески тормозить развитие отечественного турбиностроения в России, добиваясь от царского правительства поощрения импорта иностранных мащин. Достаточно сказать, что когда на Санкт-Петербургском металлическом заводе была изготовлена первая турбина, в России уже эксплуатировалось 37 импортных паровых турбин. Сдерживало развитие турбиностроения также и широкое использование в различных энергетических установках дизельных двигателей, которые при малых мощностях были достаточно выгодными.

В первые годы после начала производства турбин заказов на энергетические турбины у Санкт-Петербургского металлического завода было мало — от одной до шести турбин в год. Турбины в основном изготовлялись небольшие, мощностью 50—300 кВт. Однако, несмотря на трудности экономического характера, руководство Санкт-Петербургского металлического завода проявило достаточную дальновидность, продолжая развивать производство энергетических паровых турбин. После освоения производства турбин конструкции фирмы Рато, с целью скорейшего накопле-

ния опыта, завод наладил выпуск турбин немецкой фирмы — «Всеобщая компания электричества» (АЭГ).

Однако завод не встал на путь слепого копирования иностранных образцов. Уже на первой турбине, построенной по чертежам фирмы Рато и установленной на электростанции завода, были проведены многочисленные опыты и исследования, такие, как, например, испытания рабочих колес на прочность, определение коэффициента трения пара на лопатках, изучение особенностей заделки рабочих лопаток в ободе и др.

С 1910 г. завод начал выпускать турбины собственной конструкции.

Опыт изготовления и эксплуатации первых турбин и проведенные исследования позволили заводу внести в конструкцию своих турбин много нового и оригинального. Так, например, применявшиеся в зарубежных турбинах слабые штампованные диски были заменены коваными; вместо крепления лопаток заклепками были применены Т-образные хвостовые канавки; конструкция цилиндра была облегчена; передний подшипник отделен от цилиндра; что намного увеличило надежность работы машины.

Среди стационарных энергетических паровых турбин, выпущенных заводом в дореволюционный период, семь турбин были теплофикационными с промежуточным отбором пара, использовавшегося для местной теплофикации отдельных промышленных предприятий. Одна из теплофикационных турбин мощностью 1250 кВт (наиболее мощная из всех ранее выпущенных), изготовленная в 1914 г., была установлена на электростанции завода и, так же как и первая турбина, послужила объектом изучения с целью дальнейшего совершенствования теории и практики турбиностроения.

Всего с 1907 г. по 1917 г. Санкт-Петербургский металлический завод изготовил 26 стационарных паровых турбин суммарной мощностью 8976 кВт. Медленные темпы развития стационарного энергетического турбиностроения в дореволюционной России определялись в основном большой зависимостью экономики страны от иностранного капитала.

В лучших условиях находилось развитие судового турбиностроения, что определялось, в известной мере, большим значением морского флота для военных нужд. Техника производства судовых турбин в России была более высокой. Например, турбинная мастерская Балтийского завода, выпускавшая турбины для военно-морского флота, являлась одной из лучших в Европе. С 1910 г. до 1917 г. на заводах Петрограда было изготовлено 88 судовых турбин общей мощностью 1440 тыс. л. с. Единичная мощность судовых турбин достигала 13—16 тыс. л. с.

Подлинный расцвет отечественного энергетического турбиностроения начался после Великой Октябрьской социалистической революции. В 1918 г. конструкторское бюро Ленинградского ме-

таллического завода возобновило работу по проектированию турбин. Дальнейший рост паротурбиностроения оказался неразрывно связанным с осуществлением Ленинского перспективного плана развития народного хозяйства страны — исторического плана ГОЭЛРО, принятого IX съездом РКП(б) и утвержденного Всероссийским съездом Советов в декабре 1920 г.

В 1922 г. был организован ленинградский машиностроительный трест, объединивший ряд предприятий по производству различных типов энергетического оборудования — котлов и турбин. Этот год можно считать датой начала советского турбиностроения, масштабы которого вскоре намного превзошли масштабы турбиностроения в царской России.

Задачи, поставленные планом ГОЭЛРО, непосредственно относились к развитию Ленинградского металлического завода, бывшего в то время основным предприятием в стране, изготовлявшим энергетические паровые турбины. В 1924 г. им создается первая советская паровая турбина мощностью 2000 кВт, а уже в 1926 г. выпускается турбина мощностью 10 тыс. кВт. В 1926—1927 гг. на ЛМЗ началось строительство нового паротурбинного цеха, рассчитанного на выпуск крупных паровых турбин мощностью до 100 тыс. кВт.

В декабре 1927 г. XV съезд ВКП(б) принял Директивы о составлении первого пятилетнего плана развития народного хозяйства, а в апреле 1929 г. съезд Советов СССР его утвердил. Основной задачей в этом плане ставилось опережающее развитие тяжелой промышленности, в том числе и энергомашиностроения. Выполняя Директивы Партии, турбиностроители Ленинградского металлического завода уже в первом году первой пятилетки (1929—1933 гг.) значительно увеличили выпуск турбин.

Период первых предвоенных пятилеток стал для отечественного турбиностроения периодом больших количественных и качественных изменений. Вслед за постройкой нового мощного паротурбинного цеха на Ленинградском металлическом заводе проводилась реконструкция ряда машиностроительных заводов под турбинное производство, строились новые турбинные заводы. Характерная особенность этого периода в области развития техники турбиностроения: создание новых систем мощных паровых турбин собственной оригинальной конструкции; техническое перевооружение производства, обеспечившее организацию серийного выпуска мощных двухцилиндровых турбин; разработка более рациональной системы технологической подготовки турбинного производства.

В 1929 г. на ЛМЗ было закончено строительство нового паротурбинного цеха. В этом же году здесь была начата подготовка производства для выпуска (современных в мировом турбиностроении) паровых турбин типа АК-25-1 и АК-50-1, первая мощностью 24 тыс. кВт, и вторая — 50 тыс. кВт. Это были двухцилиндровые турбины, имевшие в целях повышения экономичности

большое количество ступеней. Выпуск первых семи турбин типа АК-25-1 состоялся в 1930 г., а первой турбины АК-50-1 — в 1931 г. Этим было положено начало серийного производства крупных турбин, ранее еще не имевшего примеров в практике мирового паротурбиностроения.

В 1930 г. мелкое и среднее турбиностроение было решено передать на ленинградский Кировский завод (ЛКЗ), бывший «Красный Путиловец», оставив на ЛМЗ производство только наиболее крупных турбин, мощностью 25 тыс. кВт и выше.

В последовавшие пять лет ЛМЗ изготовил, смонтировал и ввел в эксплуатацию несколько турбин АК-25-1 и АК-50-1. В процессе их эксплуатации произошло несколько поломок рабочих лопаток. Потребовалось проведение больших экспериментальных и теоретических исследований, а также работ непосредственно на электростанциях для приведения в надежное состояние систем облопачивания этих машин. При этом применялись уточненные методы расчетов, проводилась экспериментальная настройка лопаток и осуществлялись другие мероприятия, в результате которых аварии лопаточного аппарата были полностью изжиты.

Освоив производство этих турбин, ЛМЗ перешел к изготовлению новых мощных паровых турбин полностью собственной оригинальной конструкции. Самостоятельная конструкторская работа завода была посвящена созданию теплофикационных турбин, отвечавших требованиям народного хозяйства страны в годы первых пятилеток. Первой крупной турбиной конструкции ЛМЗ, выпущенной в 1933 г., была теплофикационная турбина типа АТ-25-1 мощностью 25 тыс. кВт при частоте вращения ротора 3000 об/мин с отбором пара до 100 т/ч. Турбины этого типа обеспечили развитие теплофикации страны в течение первых трех пятилеток. Широкое применение получила также турбина типа АП-25-1 мощностью 25 тыс. кВт с регулируемым промышленным отбором пара до 150 т/ч. Первая турбина этого типа была выпущена в 1936 г.

В 1938—1939 гг. на ЛМЗ были изготовлены турбины собственной конструкции мощностью 50 и 100 тыс. кВт типа АК-50-2, АП-50-1 и АК-100-1 — рекордные по мощности турбины с частотой вращения ротора 3000 об/мин. Выпуск этих турбин ознаменовал собой крупный прогресс советского турбиностроения.

В 1934 г. вступил в строй второй гигант советского турбиностроения — Харьковский турбогенераторный завод им. С. М. Кирова (ХТГЗ), изготовлявший до Великой Отечественной войны стационарные энергетические турбины типа АК-50 и АК-100 на 1500 об/мин. В 1935 г. изготовление турбин средней и малой мощности было организовано на Невском машиностроительном заводе им. В. И. Ленина (НЗЛ), а теплофикационных турбин малой мощности — на ЛКЗ.

На Урале в 1938 г. (в Свердловске) был построен Уральский турбинный завод — ныне Уральский турбомоторный завод

им. К. Е. Ворошилова (ТМЗ). Перед Великой Отечественной войной, в мае 1941 г. им была выпущена первая турбина типа АТ-12-1, установленная в г. Ижевске. В период Великой Отечественной войны ТМЗ был единственным заводом в стране, выпускавшим турбинное оборудование, в том числе в большом количестве турбинные лопатки для использования их в качестве запасных частей к работающим турбинам.

В период предвоенных пятилеток в турбиностроении, наряду с решением сложных конструкторских задач решались и не менее сложные проблемы технологического характера. Особо важной из технологических задач, решенных в годы первых пятилеток, было создание и совершенствование системы технологической подготовки производства турбин. Здесь следует отметить, что до начала 30-х годов технологических подразделений в системе управления турбинным производством на ЛМЗ вовсе не существовало. Функции технологов выполнялись самими мастерами, нормировщиками и так называемыми эскизниками. Последние находились в распоряжении мастеров и составляли эскизы заготовок, эскизы обработки на станках наиболее сложных деталей, выписывали наряды на выполнение работ по отдельным операциям. В наряде указывались лишь объем и содержание работы, которую должен был выполнить рабочий, но не давалось никаких указаний о том, каким методом надо было выполнить эту работу. Постоянных технологических процессов не было.

Наибольшее влияние на технологию производства турбин оказывали старшие мастера сборочных работ. Все детали изготовлялись на станках по их заказу, по их техническим указаниям. В то время еще не существовало стройной системы допусков, без которой сейчас нельзя представить никакое производство. Отсутствовали зафиксированные на чертежах технические требования к изготовлению деталей. Сопряжение даже основных частей турбины осуществлялось не по заранее установленным допускам, а по техническим указаниям старших мастеров сборочных работ, основанным на их производственном опыте. Широко применялась обработка деталей по размерам, определенным измерениями фактических размеров ранее изготовленных деталей, или, как говорят, «по месту». Такая система организации технологической подготовки производства сохранялась на ЛМЗ до конца 20-х годов. В то время она удовлетворяла завод, так как производство турбин продолжало оставаться мелким и единичным. Заказов на новые турбины было мало. Завод в основном занимался восстановлением и ремонтом старых машин.

К концу 20-х годов (1926—1929 гг.), в связи с возрастанием количества выпускаемых новых турбин стала возникать необходимость существенного изменения всей системы управления и, главное,— системы технологической подготовки турбинного производства. Методы обработки и сборки турбин без заранее раз-

работанной технологической документации, без допусков, по замерам с места и техническим указаниям мастеров сборки, стали абсолютно непригодными для серийного выпуска крупных турбин, требующего строгого соблюдения технологической дисциплины.

Учитывая новые высокие требования к организации производства, в 1929—1930 гг. на ЛМЗ и ЛКЗ стали создавать технологические службы как самостоятельные органы в системе управления производством. В задачу этих служб входила разработка технологических процессов на основе новейших достижений науки и техники, с учетом накопленного опыта производства турбин. В состав технологических служб привлекались старые опытные мастера турбинного производства и молодые инженеры. Важную роль в обеспечении технологических служб инженерными кадрами сыграл втуз, организованный при ЛМЗ в 1930 г. Первый выпуск инженеров из этого втуза состоялся в 1932 г. Приход на производство высококвалифицированных инженеров содействовал быстрому совершенствованию технологической подготовки производства, повышению ее качества, техническому перевооружению производства на серийный выпуск турбин.

К большим работам, выполненным в начале тридцатых годов в области коренного совершенствования системы технологической подготовки производства, относятся: разработка технических требований к обработке деталей; определение рациональных допусков и посадок для основных элементов турбин; проведение классификации деталей и типизации технологических процессов; подготовка предложений по широкой унификации деталей, как базы для снижения циклов технологической подготовки производства и циклов изготовления самих турбин. В целом можно сказать, что в этот период закладывались научные основы технологии тяжелого турбиностроения.

Создание на предприятиях технологических служб явилось высоко прогрессивным мероприятием и ознаменовало начало нового периода в развитии отечественного турбиностроения. Разрабатываемые этими службами технологическая документация и средства оснащения производства явились необходимыми исходными данными для научной организации труда как всех структурных подразделений управления производством, так и самого производства. Начиная с 1933—1934 гг., обработка деталей без заранее разработанной технологии была полностью изжита.

На ЛМЗ закладывались основы конструирования, технологии и организации советского паротурбиностроения. Все другие заводы нашей страны, подключавшиеся к производству турбин, пользовались опытом ЛМЗ, который оказывал им большую техническую помощь.

Выдающихся успехов советское турбиностроение добилось в годы послевоенных пятилеток. Турбинные заводы приступили к производству турбин особо больших мощностей (100, 200 и

300 МВт) с высокими, сверхвысокими и сверхкритическими параметрами пара. В 1947 г. на НЗЛ изготовлением первой экспериментальной газовой турбины мощностью 1000 кВт было положено начало отечественному газотурбиностроению. В связи с развитием газовой промышленности НЗЛ стал основным поставщиком газотурбинных установок для газоперекачивающих станций газопроводов.

Выполнение задач, поставленных планами развития народного хозяйства в послевоенный период, характеризовалось широким вводом в эксплуатацию мощных турбоблоков (по 200 и 300 МВт), созданием агрегатов мощностью 500 МВт на ХТГЗ и одновального и двухвального по 800 МВт на ЛМЗ.

Развитию техники турбиностроения содействовала специализация турбинных заводов. Так, ЛМЗ и ХТГЗ в основном выпускают конденсационные паровые и энергетические газовые турбины большой единичной мощности (от 100 МВт и выше). ТМЗ выпускает теплофикационные турбины мощностью от 50 МВт и выше, а также газовые турбины для газоперекачивающих станций мощностью от 6 МВт.

Выполнение больших государственных задач по развитию народного хозяйства страны способствовало росту выпуска турбоблоков большой единичной мощности. Решениями XXIV съезда КПСС в 9-й пятилетке намечено дальнейшее производство блоков мощностью 500 и 800 МВт, газовых турбин мощностью 100 МВт, реакторных установок мощностью 1000 МВт и выше для АЭС, изготовление энергетического блока мощностью 1200 МВт.

Задачей дальнейшего развития турбиностроения является увеличение единичных мощностей агрегатов, повышение параметров пара, надежности и экономичности турбин, автоматизация турбоустановок, повышение их маневренности. Наряду с созданием новых конструкций турбин будет осуществляться коренное совершенствование технологии производства, оснащение турбинных заводов новейшей техникой.

Широкое дальнейшее развитие получат специализация заводов и кооперирование их на базе осуществляемой широкой унификации и типизации отдельных частей турбин. Крупным шагом в развитии технологии турбиностроения является создание специализированного завода турбинных лопаток.

Большой вклад в развитие теоретических и практических основ турбиностроения внесли отечественные ученые и специалисты. Чл. корр. АН СССР А. А. Радциг, автор одного из первых русских учебников по паровым турбинам, и чл. корр. АН СССР М. И. Яновский, разработавший методы расчета на прочность деталей турбин, вложили много труда в развитие теории турбиностроения в России и подготовку инженерных кадров.

Зарождение и развитие советского турбиностроения тесно связано с именем проф. д-ра техн. наук М. И. Гринберга (1896—

1957 г.), более 30 лет являвшегося главным конструктором ЛМЗ. Под его руководством спроектированы первые советские мощные одновальные турбины АК-50-2, АК-100-1, АП-50-1 (50 и 100 тыс. кВт), а также другие уникальные турбины. Им создана целая школа ученых в области турбиностроения, выполнившая большое число теоретических и экспериментальных работ, способствовавших быстрому развитию советского турбиностроения.

Наряду с накоплением опыта эксплуатации турбин, на ЛМЗ проводились исследовательские работы по изучению их аэродинамики и прочности. Проводившиеся еще в довоенное время исследования показали, что дальнейшее повышение давления и температуры свежего пара может дать резкое повышение экономичности электростанций.

Во время Великой Отечественной войны конструкторским бюро завода были разработаны проекты серии турбин высокого давления мощностью 25, 50 и 100 тыс. кВт с частотой вращения 3000 об/мин. На базе этой серии турбин в послевоенное время развивалось производство мощных турбин (50—1200 МВт) с высокими начальными параметрами пара.

В развитии технологии турбиностроения исключительно большие заслуги принадлежат Центральному научно-исследовательскому и проектно-конструкторскому котлотурбинному институту им. И. И. Ползунова (ЦКТИ), Центральному научно-исследовательскому институту технологии и машиностроения (ЦНИИТМАШ), Всесоюзному проектно-технологическому институту энергетического машиностроения (ВПТИэнергомаш), а также другим научно-исследовательским организациям и промышленным предприятиям.

Впервые в качестве самостоятельной дисциплины технология производства турбин была включена в учебный план специальности «Производство паровых турбин» втуза ЛМЗ, созданного в 1930 г. Преподавателем этого курса был инженер турбинного цеха ЛМЗ Б. В. Шостакович, один из авторов первого труда по технологии турбиностроения, освещающего в основном опыт ЛМЗ. Опыт ЛМЗ, в частности по обработке крупных деталей и по типизации технологических процессов, нашел также отражение в широко известных трудах проф. А. П. Соколовского, тесно сотрудничавшего с технологами турбинных заводов Ленинграда и содействовавшего повышению их деловой квалификации.

В послевоенные годы литература по технологии турбиностроения пополнилась крупными научными монографиями и большим количеством статей по отдельным актуальным вопросам технологии турбиностроения в периодических изданиях. Большую ценность представляют сборники трудов ЛМЗ.

В настоящее время дисциплина «Технология производства и монтажа паровых и газовых турбин» является одной из ведущих дисциплин учебного плана высших технических учебных заведений по специальности 0521 (турбиностроение). На материалах

этой дисциплины базируется технологическая часть дипломного и курсового проектирования.

Материал настоящего учебника построен с учетом знания студентами основ металлургического производства, учения о резании металлов, устройства режущих инструментов, способов обработки деталей на металлорежущих станках, сварки и других предметов, изучаемых в предшествующих дисциплинах учебного плана.

В соответствии с программой учебник содержит научные основы технологии машиностроения и описание технологических процессов механической обработки и сборки основных характерных деталей и сборочных единиц турбин. Ввиду того что обработка и сборка деталей паровых и газовых турбин принципиально одинаковы, в учебнике в основном рассматривается технология производства паровых турбин. По газовым турбинам изучаются лишь особенности процессов, вызываемые принципиальным отличием в конструкции отдельных деталей паровых и газовых турбин.

Введение и главы I—VIII, XIII, XVII, XXVII написаны Н. Я. Бауманом; главы IX, X, XIV, XVI — М. И. Яковлевым; главы XI, XII, XV, XVIII—XXII — И. Н. Свечковым; главы XXIII, XXIV—XXVI — совместно Н. Я. Бауманом и И. Н. Свечковым.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

Глава I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1. Производственный и технологический процессы

В курсах технологии машиностроения различают два понятия: производственный и технологический процессы.

Производственный процесс включает в себя полный комплекс работ, выполняемых для обеспечения выпуска определенной продукции.

Этот комплекс состоит из основных, вспомогательных и подготовительных работ.

К основным относятся все работы, непосредственно связанные с обработкой деталей изготовляемых машин, их сборкой, проверкой и испытанием.

К вспомогательным относятся работы по изготовлению инструментов, приспособлений, моделей и другой технологической оснастки; работы по межцеховому транспортированию грузов (материалов, заготовок, деталей, сборочных единиц и готовой продукции); работы по организации и содержанию в порядке рабочих мест, складского хозяйства и т. п.

К подготовительным относятся работы по проектированию изделий и составлению рабочих чертежей для их изготовления; по разработке технологических процессов, заказу и проектированию необходимого универсального и специального оборудования и всех видов технологической оснастки; работы по реконструкции предприятий, а также все другие работы, которые должны подготовить постановку новых изделий на производство, поддерживать нормальный ход действующего производственного процесса, обеспечивать непрерывное его совершенствование, а также постоянное развитие научно-технического прогресса в соответствующей отрасли машиностроения.

Основные работы, связанные с непосредственным изготовлением продукции, называют *технологическими процессами* данного предприятия.

2. Производственная структура машиностроительного завода

Производственный процесс на заводе осуществляется входящими в его состав цехами, службами и хозяйствами (складским, транспортным и др.), а также отделами: конструкторским, технологическим, снабжения, сбыта, плановым, диспетчерским и др., основной задачей которых является подготовка, планирование и организация производства.

На различных машиностроительных заводах, исходя из принципа обеспечения наибольшей рациональности производственного процесса для данных конкретных условий, организация основных производственных подразделений (цехов, участков, отделений) может быть функциональной или предметной. При функциональной системе изготовление продукции организуется в специализированных цехах (литейном, кузнечном, механических, термическом и др.), для каждого из которых характерен свой производственный процесс с определенной технологией производства. При предметной системе отдельные производственные цехи или участки изготовляют определенные законченные части машин, т. е. отдельные конкретные предметы (технологические узлы или сборочные единицы, комплекты, законченные агрегаты машин и т. д.). В таком производственном цехе или участке могут применяться самые различные виды технологических процессов. В этом случае цех работает по замкнутому производственному циклу.

Нередко на машиностроительных заводах для организации цехов используют одновременно и обе системы: функциональную и предметную. Такая смешанная система организации цехов и участков машиностроительного завода часто оказывается наиболее эффективной при изготовлении крупных машин.

В соответствии с основным назначением цехи завода подразделяются на основные производственные, подсобные производственные и вспомогательные.

Основные производственные цехи, в свою очередь, разделяются на две главные группы. К первой группе относятся заготовительные цехи, к второй — обрабатывающие и сборочные. К заготовительным цехам в турбинном производстве относятся раскройно-заготовительные, котельно-сварочные, литейные, кузнечные, лесопильные и другие цехи, в которых изготовляют полуфабрикаты (заготовки), необходимые для производства основных изделий завода и подлежащие обработке в других его цехах или отправляемые на сторону без последующей обработки на данном предприятии.

В группу обрабатывающих входят цехи механические, термические, металлопокрытий, нормалей и другие, в которых производится полная или частичная обработка деталей и других элементов изделий. Сборочными являются цехи, в которых произ-

водится сборка отдельных сборочных единиц или изделий в целом. В них же иногда производится и испытание изделий, однако чаще всего испытание основных изделий машиностроительных заводов производится в специально оборудованных испытательных цехах.

На отечественных турбинных заводах обрабатывающие цехи организуются с замкнутым циклом. Например, создаются цехи механосборочные; цехи обработки деталей и крупных сборочных единиц (корпусов, роторов, обойм, диафрагм и т. п.); цехи механизмов парораспределения и регулирования; цехи лопаточные и др. Такие цехи выполняют как механическую обработку деталей, так и сборку и испытание выпускаемых ими элементов турбин.

К подсобным производственным относятся такие цехи, продукция которых необходима для выпуска готовых турбин и других изделий основными производственными цехами (например, тарный цех и др.).

Вспомогательными называются цехи, выполняющие вспомогательные технические функции для нужд производственных цехов. В турбинном производстве к ним относятся инструментальный, штампов и приспособлений (на ряде заводов они объединены в один инструментальный цех), модельный, абразивный, нестандартного оборудования, ремонтно-механический, электроремонтный, ремонтно-строительный, экспериментальный и др.

3. Основные задачи подготовки производства на машиностроительном заводе

Весьма ответственной частью производственного процесса изготовления того или иного объекта в машиностроении, например турбины, является подготовка производства. Она состоит из двух основных этапов — конструкторского и технологического, и выполняется соответственно отделами главного конструктора, главного технолога и главного металлурга, а также группой цехов, изготовляющих инструменты, приспособления, нестандартное оборудование, средства контроля и испытания изделий и другие специальные средства производства. Деятельность всех трех отделов и цехов возглавляется и объединяется главным инженером предприятия или его заместителем по подготовке производства.

Ведущими отделами в общей системе подготовки производства являются конструкторские отделы и отдел главного технолога.

В объем работ по конструкторской подготовке производства входят:

а) разработка технического проекта новой машины, согласование его с заказчиком и защита технического проекта перед отраслевыми научными и вышестоящими организациями;

б) конструирование машины, ее механизмов, отдельных сборочных единиц и деталей; экспериментальные проверки конструкций; разработка технических требований к машине, ее частям и отдельным деталям в соответствии с потребностями эксплуатации, обработки и сборки; оформление конструкторских разработок в виде рабочих чертежей, сборочных схем, спецификаций и изготовление рабочих чертежей, а также всей другой конструкторской документации на кальках;

в) составление необходимых руководств по сборке и эксплуатации сконструированных объектов; изготовление чертежных и фотографических иллюстраций к этим руководствам и каталогам;

г) передача чертежей в архив и светокопировальную мастерскую; изготовление необходимого количества экземпляров светокопий, в первую очередь для технологического отдела.

В процессе технологической подготовки производства решаются следующие задачи:

а) обеспечение контроля технологичности конструкции новых машин;

б) расцеховка деталей и механизмов изготовляемых машин по цехам-исполнителям (маршрутизация); выбор вида заготовок для каждой детали (при этом определяют, какие из них целесообразно изготовлять своими силами в заготовительных цехах завода и какие следует заказать на другие предприятия в порядке кооперации); разработка материальных нормативов в виде специфицированных ведомостей по всем видам, сортам и размерам примененных в изделии материалов и составление сводных норм расхода материалов на каждое изделие, являющихся основой для работы отдела материально-технического снабжения;

в) проектирование технологических процессов изготовления деталей и сборочных единиц новой машины, обеспечивающих выполнение заданных технических условий при достаточной экономичности производства и в соответствии с техническими возможностями предприятий; оформление технологической документации; конструирование специальных средств производства, т. е. технологической оснастки всех видов (инструментов, приспособлений, средств контроля и испытания изделий и т. д.);

г) установление норм выработки по всем операциям, предусмотренным технологическими процессами;

д) изготовление силами самого предприятия или приобретение на стороне недостающего оборудования и инструмента в количествах, обеспечивающих развертывание производства до заданного объема;

е) передача разработанной технологической документации и технологической оснастки производственным цехам; технологическая помощь цехам в освоении новых конструкций, технологи-

ческих процессов и оснастки; надзор за соблюдением и правильным применением технологии и технологической оснастки.

Здесь следует особо подчеркнуть большое значение работ по обеспечению высокой технологичности конструкций деталей, сборочных единиц и всех других элементов проектируемых машин.

В понятие технологичность конструкции отдельные ученые и специалисты вкладывают несколько различное содержание, но в целом под технологичностью понимаются такие свойства конструкции изделий, которые обеспечивают возможность применения при их изготовлении наиболее технико-экономически целесообразных технологических процессов при полном обеспечении заданных технических требований к качеству изделий и их эксплуатационным свойствам.

Само собой разумеется, что обеспечение технологичности должно осуществляться не после разработки конструкции, а непосредственно в процессе проектирования машин. Эту задачу должны решать уже сами проектировщики машин, т. е. конструкторы, однако они, как правило, не обладают всеми необходимыми специальными знаниями в этой области, поэтому во многих проектно-конструкторских организациях и конструкторских отделах предприятий организуются специальные подразделения (например, технологические бригады), на которые возлагается обязанность оказывать помощь конструкторам с целью обеспечения технологичности конструкции всех элементов новых машин и производить технологический контроль чертежей. К работе в таких подразделениях привлекаются наиболее квалифицированные и опытные технологи. В ряде случаев эту работу выполняют и сами технологические отделы предприятия, однако в таком случае они также должны участвовать непосредственно в процессе разработки новых конструкций.

Внесение каких-либо изменений в уже готовую конструкцию с целью повышения ее технологичности в принципе возможно и практически допускается, однако это, в большей или меньшей степени, осложняет уже налаженный процесс производства.

Технологические свойства конструкции оказывают большое влияние на весь процесс подготовки производства новых изделий, а также на все технико-экономические характеристики самого производства. Поэтому обеспечению высокой технологичности конструкции должно уделяться самое большое внимание.

По мере освоения нового изделия в задачи подготовки производства входят:

а) внесение изменений в конструкцию отдельных деталей и сборочных единиц, направленных на улучшение качества машины или облегчающих ее изготовление без ущерба для качества;

б) уточнение всякого рода документов, формулирующих технические требования к машине и ее частям;

в) внесение изменений в технологию изготовления машины в целях повышения ее качества или улучшения экономики производства;

г) уточнение нормативов, связанных с применяемыми методами производства;

д) наблюдение за правильным использованием технологической оснастки, а также другие работы, обеспечивающие нормальный ход производства.

Анализ приведенного выше состава конструкторской и технологической документации, разрабатываемой в отделах главного конструктора, главного технолога и главного металлурга, позволяет установить ее большое значение для правильной организации работы всех структурных подразделений предприятия — технических, плановых, вспомогательных, снабжения, кооперирования, сбыта и др.

Особенно велико значение технологической документации для обеспечения работы основных производственных цехов. В технологических картах указываются: вид заготовок обрабатываемых деталей, применяемое оборудование, оснащение, специальность исполнителей и разряд работ (квалификация), нормируемое время обработки, маршрут прохождения деталей по цехам завода и другие сведения, касающиеся правильного ведения производственного процесса. На основании технологических карт составляются нормативы по трудоемкости обработки на отдельные сборочные единицы, а затем и суммарные в целом на всю машину. Эти документы позволяют определять: трудовые затраты на изготовление турбины с разбивкой по группам оборудования и по разрядам работ, трудоемкость станочных и слесарно-сборочных работ и т. д.

На основании разработанных технологических процессов составляются также цикловые графики [7] по ведущим узлам машины, позволяющие определять календарное время изготовления машины. Таким образом, технологическая документация позволяет всем подразделениям завода наиболее целесообразно организовывать и планировать производство изделий.

4. Сроки подготовки производства

Технологическую подготовку производства можно разделить на три периода: подготовительный, освоения и совершенствования. Подготовительный период включает в себя разработку всей технологической документации (чертежей турбины, технологической документации, чертежей специального оснащения) и изготовление специального оснащения в металле. Период освоения определяется временем освоения производства новой турбины и заканчивается выпуском головного образца. В течение этого периода допускаются некоторые отступления от запроектированной технологии, связанные, обычно, с отсутствием полного комп-

лекта специальной оснастки специальных видов оборудования или с другими причинами. Период совершенствования технологических процессов изготовления турбин начинается после полного освоения производства нового объекта по запроектированной технологии и продолжается, практически, до полного окончания его производства.

Наиболее ответственным, с точки зрения сокращения сроков выпуска головного образца, является первый период. Выполнение каждого из этапов этого периода (изготовление чертежей машины, разработка технологических процессов, проектирование специального оснащения и др.) требует большой тщательности и глубины проработки и отличается (особенно для современных турбин большой единичной мощности) значительной продолжительностью — до года и более.

С целью сокращения общего срока подготовки производства и ускорения выпуска новых изделий в практике турбиностроения широко используется последовательно-параллельный способ выполнения всех работ по подготовке производства. При этом конструкторские разработки начинают с более крупных сборочных единиц и деталей, требующих длительного цикла производства, например с роторов, цилиндров и т. п. Заготовки для таких крупных деталей поставляются турбинным заводам по кооперации.

В то время, когда еще оформляются заказы на кооперированную поставку заготовок для этих деталей и организовывается их изготовление на других предприятиях, на самом турбинном заводе для их обработки разрабатываются технологические процессы, проектируется и изготовляется специальная оснастка. Одновременно с этим ведется конструкторская разработка и готовятся технологические процессы для более простых частей турбины.

При такой организации работ к моменту получения заготовок для крупных деталей на самом турбинном заводе обычно бывает уже подготовленным все для их обработки. То же относится и к более мелким частям турбины. Таким образом, при последовательно-параллельном методе технологической подготовки производства общий цикл изготовления турбины с момента получения заказа и до ее выпуска резко сокращается. Так, например, для турбины Т-100-130, имеющей более 10 000 наименований оригинальных деталей (исключая нормали), он составил всего около трех лет.

Большое положительное влияние на сокращение общего цикла производства турбины и сроков подготовки производства оказывает повышение степени унификации как отдельных деталей, так и сборочных единиц и машин в целом, доходящей для некоторых типов турбин до 30—40%.

Степень унификации

$$\psi = \frac{Y \cdot 100}{N}\ \%,$$

где Y — количество унифицированных деталей или сборочных единиц, примененных в данном изделии;

N — общее количество деталей или сборочных единиц в изделии.

При повышении степени унификации резко сокращается цикл подготовки производства каждого следующего нового типа турбин, снижается трудоемкость и стоимость; количество наименований дополнительно изготовляемой специальной оснастки существенно уменьшается, что видно из табл. 1.

Таблица 1

Количество новых наименований специальной оснастки, изготовленной для однотипных турбин

Вид оснастки	Тип турбин					
	ТП-25-90	Т-25-90	ПТ-50-130	Т-50-130	Т-100-130	ПР-25-90
	Очередность выпуска					
	I	II	III	IV	V	VI
Приспособления	730	53	542	60	371	61
Режущие инструменты	624	14	357	42	186	17
Измерительные инструменты . . .	1176	33	983	200	471	57
Вспомогательные инструменты	333	1	292	21	54	11

Для конструкторского отдела первый период работы заканчивается передачей чертежей в архив и изготовлением необходимого количества экземпляров светокопий для цехов и технических служб, в первую очередь для технологических отделов.

Для технологических служб период подготовки и освоения производства новых объектов, особенно таких крупных, как турбины, обычно существенно осложняется тем, что инструментальные цехи не успевают закончить изготовление всей необходимой технологической оснастки к выпуску первого головного образца. Поэтому весь объем заказанной оснастки, в зависимости от ее значимости, разбивается на несколько групп по очередности изготовления. Минимально необходимая оснастка, т. е. та оснастка, без которой совершенно невозможно выполнение технологических операций (например, модели, специальные измерительные инструменты, профильные фрезы для обработки лопаток и т. п.), включается в графики нулевой очереди. При изготовлении головного образца на выполнении работ, включенных в эти графики, сосредоточивается внимание всего коллектива завода. Полное освоение производства достигается уже после изготовления всего комплекта заказанной оснастки и ее внедре-

ния в производство (обычно не ранее чем на пятом или шестом образце новой крупной турбины).

Это требует от технологов особо тщательной проработки вопросов технологического оснащения производства с учетом, с одной стороны, реальных возможностей завода и, с другой стороны, необходимости достижения в этих условиях оптимальной производительности труда и высокого качества продукции. С целью сокращения объемов работ по изготовлению технологической оснастки следует максимально использовать универсально-наладочные и универсально-сборные приспособления.

Унифицированные и стандартизованные элементы таких приспособлений могут использоваться многократно, поэтому отпадает необходимость изготовлять их заново при постановке на производство новых машин.

5. Технологическая документация

Технологический процесс доводится до исполнителя в виде карт технологического процесса. Стандартных форм для таких карт ранее не существовало, поэтому каждое машиностроительное предприятие разрабатывало их по своему усмотрению в соответствии с установившимися на данном предприятии характером организации производства и методикой разработки технологических процессов. Однако общим для всех форм технологических карт является наличие в них следующих данных и указаний:

а) наименование или тип изготовляемой машины и ее полное обозначение;

б) наименование детали и номер чертежа, марка материала, твердость, вид заготовки;

в) номер и наименование выполняемой по данной карте операции технологического процесса;

г) содержание операции и эскиз обработки;

д) применяемое оборудование;

е) используемая технологическая оснастка: приспособления, режущий и измерительный инструменты, средства контроля и испытания и др.;

ж) профессия и квалификация (разряд работы) исполнителя;

з) норма времени или выработки, расценка работы.

При необходимости в технологических картах и в другой технологической документации помещаются различные другие сведения, которые разъясняют сущность выполняемых по данной документации работ.

В целях установления лучшего взаимопонимания между различными организациями, предприятиями и отраслями машиностроения в настоящее время разрабатывается единая система технологической документации (ЕСТД). В этой системе будут

применяться стандартные формы технологических карт, обязательные для предприятий всех отраслей машиностроения.

Работу по созданию стандартной технологической документации выполняет Всесоюзный научно-исследовательский институт по нормализации в машиностроении (ВНИИНМАШ), входящий в систему Госстандарта СССР. Активное участие в этой работе принимают многочисленные организации и предприятия машиностроения.

Следует особо отметить, что все системы АСУП основываются на применении современных средств вычислительной техники — электронно-вычислительных машин — ЭВМ. В частности, с их помощью на некоторых предприятиях уже разрабатываются технологические процессы обработки стандартных и унифицированных деталей, составляются необходимые для подготовки производства сводные ведомости расхода материалов, норм времени по специальностям и квалификации исполнителей, ведомости загрузки оборудования и др.

В ряде случаев ЭВМ используется и для разработки чертежей заготовок (поковок, штамповок и др.). Использование ЭВМ для таких работ возможно только при наличии стандартных форм технологической документации. В этих формах должно предусматриваться не только обязательное помещение определенных данных, но и размещение их в точно определенных местах технологических карт, что является необходимым условием для обеспечения возможности считывания нужных параметров с помощью ЭВМ.

Некоторые из стандартных форм технологической документации уже разработаны и утверждены. В ряде случаев производится их опробование в практической деятельности предприятий. Общий порядок их внедрения на всех машиностроительных предприятиях будет определяться утвержденными правилами. Таким образом, в ближайшие годы использование предприятиями собственных форм технологической документации будет постепенно исключаться.

До повсеместного применения единой системы технологической документации на турбостроительных заводах в качестве основного документа по технологии механической обработки все еще широко используются карты краткого технологического процесса (приложение 1). В них записываются номера операций, их наименования и краткое содержание выполняемых работ.

При работе по картам технологического процесса обязательно надо пользоваться и рабочими чертежами, обрабатываемых деталей и сборочных единиц. В технологических картах на механическую обработку ответственных деталей даются эскизы, разъясняющие содержание работы по некоторым сложным операциям; наличие операционных эскизов особенно необходимо, когда запись содержания операции без эскиза оказывается не-

достаточной для ее полного понимания или когда наличие эскиза значительно упрощает и сокращает соответствующую запись.

В цехах, изготовляющих турбинные лопатки, применяются операционные карты (приложение 2). Эти карты составляются отдельно на каждую операцию. В них даются эскизы[1] обработки, указываются способы измерения деталей, места и методы клеймения, режимы резания. По таким подробным операционным картам работа может производиться и без чертежей, так как все размеры, которые должны быть у заготовки после данной операции, указываются в эскизах. Такой специфичный метод разработки технологического процесса изготовления турбинных лопаток объясняется исключительно большой сложностью формы этих деталей и особенностью их обработки, при которой для ряда начальных и промежуточных технологических операций, связанных с подготовкой базовых поверхностей и предварительной обработкой профильных частей, технологами указываются размеры, отличные от указанных на рабочих чертежах лопаток. Для расчета технически обоснованных норм применяются операционно-нормировочные карты (приложение 3). Кроме указанных карт механической обработки применяются технологические карты сборки, сварки и других видов работ (приложения 4 и 5).

6. Цеховые органы подготовки производства

Во всех цехах машиностроительных заводов, в том числе и турбиностроительных, в которых технологический процесс и применяемый инструментарий являются сложными, а номенклатура изделий достаточно большой, создаются цеховые органы подготовки производства — технологические бюро. Технологическое бюро цеха возглавляется начальником бюро, которому в ряде случаев предоставляются права заместителя начальника цеха. В состав бюро входят технологи, нормировщики и инженеры или техники по инструменту. В крупных цехах создаются особые бюро инструментального хозяйства. Начальник этого бюро подчиняется начальнику технологического бюро цеха или заместителю начальника цеха по подготовке производства.

В обязанность цеховых технологов входит контроль точного выполнения утвержденных технологических процессов, ликвидация всех отклонений и возникающих неполадок. В период освоения новых объектов или отдельных методов обработки цеховые технологи участвуют в разработке технологических процессов и являются основными инструкторами, помогающими мастерам, наладчикам и рабочим полностью освоить новые виды

[1] Эти эскизы следует выполнять в определенном масштабе, чтобы у ведущего обработку рабочего складывалось вполне четкое представление о выполняемой операции.

работ и установленные для них нормы выработки. Ведя повседневное наблюдение за ходом работ, они сигнализируют центральному технологическому отделу о недостатках разработанных технологических процессов или инструментария и дают предложения о необходимых изменениях. В период проектирования технологических процессов изготовления новых объектов цеховые технологи консультируют центральный технологический отдел также по вопросам загрузки цехового оборудования и т. п.

Как видно из изложенного, основой системы подготовки производства на турбиностроительных заводах является централизация всех основных работ в общезаводском масштабе и передача цеховым органам только оперативных функций, выполнение которых требует постоянного присутствия технологов в цехе.

7. Основные типы производства

В зависимости от объема производственной программы и характера изготовляемой продукции, в машиностроении различают следующие основные типы производства: единичное, мелкосерийное, серийное, крупносерийное и массовое.

Серийность производства в машиностроении определяется номенклатурой и повторяемостью изготовляемых изделий, их количеством в годовой программе выпуска, с учетом весовой характеристики изделий, сложности конструкции и трудоемкости их изготовления. Тип производства не всегда может быть резко выражен. Так, например, при единичном изготовлении турбин производство лопаток, а также и крепежных деталей, идущих на турбины в больших количествах, при определенной степени унификации может стать серийным. Особенно часто сопутствуют друг другу единичное и мелкосерийное производства; крупносерийное и массовое. Поэтому в практике проектирования машиностроительных заводов принято рассматривать три типа производства: единичное и мелкосерийное, серийное, крупносерийное и массовое.

В ряде случаев в одном цехе одновременно осуществляется производство изделий с разной серийностью. Характер организации производства в цехе обычно относят к тому типу серийности, который является в данном цехе преобладающим.

Единичным и *мелкосерийным* называется производство с разнообразной номенклатурой изготовляемых изделий, каждое из которых выпускается в небольших количествах и на протяжении года не повторяется или повторяется через достаточно большие промежутки времени. Этот тип производства характеризуется в механических цехах применением универсального оборудования, располагаемого преимущественно по группам одинаковых видов обработки; универсальных приспособлений; нормального и лишь в небольшой части специального инстру-

мента; универсальных подъемно-транспортных устройств и т. п. Примерами данного типа производства могут служить — турбинное, крупного машиностроения, например производство блюмингов, трубопрокатных станов и тому подобных машин.

Серийным называется производство с установившейся номенклатурой изделий, изготовляемых сериями (например, металлорежущие станки), повторяющимися регулярно через определенные промежутки времени. В зависимости от количества изделий в серии и их размерной характеристики серийное производство подразделяется на мелко-, средне- и крупносерийное.

В качестве ориентировочных суждений о характеристике серийности (с учетом размеров изготовляемых машин) можно воспользоваться табл. 2.

Таблица 2

Характеристика серийности

Серийность производства	Количество машин в год		
	Крупные	Средние	Мелкие
Мелкосерийное	2—5	5—25	10—50
Среднесерийное . . .	5—25	25—150	50— 300
Крупносерийное. . . .	Св. 25	Св. 150	Св. 300

При серийном производстве в механических цехах наряду с универсальным оборудованием, приспособлениями и нормальными инструментами применяется специализированное оборудование, а для отдельных видов операций — и специальные станки. Более широко используются специальные приспособления и инструменты.

Отделения и участки цехов организуются по технологически сходным деталям с установкой оборудования в порядке последовательности выполнения технологических операций. По отдельным, более массовым деталям, оборудование устанавливается по поточным линиям. Для приближения технического уровня серийного производства к крупносерийному организуются групповые поточные линии для обработки технологически однородных деталей, например турбинных лопаток.

Крупносерийным и *массовым* называются производства с установившейся номенклатурой, включающей одно или несколько изделий, выпускаемых в больших количествах на протяжении нескольких лет.

8. Общая характеристика турбинного производства

Рассматривая паро-газотурбинное производство в свете приведенных характеристик, следует, в общем, отнести его к серийному с отдельными участками мелкосерийного типа (цилиндры,

роторы), среднесерийного (диски, диафрагмы) и крупносерийного (рабочие и направляющие лопатки). Разработка технологических процессов ведется с учетом указанных типов производства.

В паро-газотурбиностроении, особенно в лопаточных цехах для обработки крупных лопаток, широко используется поточный метод организации производства с применением специальных и специализированных станков.

Для обработки крупных деталей (цилиндров, роторов, дисков, диафрагм) создаются групповые поточные линии, которые в отличие от поточных линий обработки одних и тех же массовых деталей служат для одновременной обработки различных, но технологически однородных деталей с одинаковым или близким технологическим маршрутом. Оборудование в групповой поточной линии устанавливается в соответствии с последовательностью выполнения технологических операций для изготовления типовой или «комплексной» детали, т. е. такой детали, для которой используется наибольшее количество операций. Для отдельных типов операций, например для обработки пазов под лопатки в роторах газовых турбин, расточки цилиндров высокого давления по половинам, фрезерования косых разъемов у диафрагм и других наиболее сложных и трудоемких операций, обычно применяются специальные станки. При необходимости использования универсальных станков они модернизируются и снабжаются групповыми наладками.

9. Станочный парк турбинных заводов

Станочный парк турбинных заводов состоит в основном из универсальных станков. Анализ их загрузки при производстве одной турбины дает следующие усредненные показатели в % к общей трудоемкости механической обработки: токарно-центровые — 26; карусельные — 11,4; расточные — 7,7; шлифовальные — 3,9; фрезерные — 32,2 (из них для обработки лопаток — 23); продольно-строгальные — 1,5; поперечно-строгальные — 0,3; долбежные — 0,7; сверлильные — 8,7; зубообрабатывающие — 0,4; протяжные — 0,1; прочие — 7,1 (из них для шлифования и полирования лопаток — 5,7).

В парке станочного оборудования, кроме обычных универсальных станков для обработки крупных деталей турбин, необходимо иметь уникальные (по размерам) станки: токарные с высотой центров 1000—2000 мм и расстоянием между центрами до 12 000 мм; карусельные с диаметром планшайбы 6000—12 000 мм и высотой траверсы до 5000 мм; круглошлифовальные с высотой центров 600—1200 мм и расстоянием между центрами 12 000 мм; продольно-строгальные или продольно-фрезерные с размером стола до 5000 × 12 000 мм и высотой траверсы до

4000 мм; расточные (горизонтально-сверлильно-фрезерные) с диаметром шпинделя до 250 мм и поворотными столами с площадью 2500 × 2500 мм; радиально-сверлильные с вылетом хобота до 4000 мм и диаметром сверления до 100 мм; копировально-фрезерные, копировально-строгальные и копировально-шлифовальные для обработки лопаток длиной свыше 1000 мм.

В составе специального оборудования должны иметься станки для динамической балансировки роторов, станки с электропечами для теплового испытания турбинных валов, установки с электропечью для насадки дисков на вал, станки для кантования турбинных дисков, разметочные плиты с размерами 4000 × × 6000, 6000 × 8000 мм.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Глава II. СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1. Структура изделий и классификация деталей

Продуктом конечной стадии всех отраслей промышленности является изделие. *Изделием* (по ГОСТу 2.101—68) называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. Устанавливаются следующие виды изделий: а) детали; б) сборочные единицы; в) комплексы; г) комплекты.

Деталь — изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций, например: валик из одного куска металла; литой корпус.

Сборочная единица — изделие, составные части которого подлежат соединению между собой на предприятии-изготовителе сборочными операциями (свинчиванием, сочленением, клепкой, сваркой, пайкой, опрессовкой, развальцовкой, склеиванием, сшивкой и т. п.). В технологии сборочные единицы принято называть узлами.

Комплекс — два и более специфированных изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций, например: поточная линия станков, турбина и вспомогательное оборудование к ней и т. п.

Комплект — два и более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих набор изделий, имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например: комплект запасных частей; комплект инструмента и принадлежностей; комплект измерительной аппаратуры; комплект упаковочной тары и т. п.

К покупным относят изделия, не изготовляемые на данном предприятии, а получаемые им в готовом виде, кроме поставляемых в порядке кооперирования.

Каждая турбина состоит из большого количества деталей, уникальных по сложности и размерам (цилиндры, роторы, рабочие колеса, обоймы, диафрагмы и т. д.), мелких и средних (валики, втулки, шпонки и др.). Например, турбина ВПТ-25-3

вместе со вспомогательными механизмами имеет свыше 3000 наименований различных деталей.

Для лучшей организации и обеспечения большой эффективности работ по подготовке производства целесообразно проводить классификацию деталей по типам и видам обработки. Это позволяет создать единство технологических решений для однотипных деталей, разработав для определенных групп деталей типовые технологические процессы; сократить сроки проектирования и подготовки производства; создать условия для более правильного нормирования работ и уменьшить объем технологической документации. Для удобства проведения классификации турбинные заводы заменяют порядковую систему нумерации чертежей предметной. При этой системе рабочие чертежи разделяются на классы, секторы и группы. Так, например, классификатор Калужского турбинного завода представляет собой круг, разделенный окружностями на три части; внутренний круг, среднее кольцо, наружное кольцо.

В центральной части классификатора (во внутреннем круге) ставится номер класса — это номер, присвоенный одному из выпускаемых заводом изделий. Например, турбина паровая — 1, турбина газовая — 2, насос питательный — 3. Среднее кольцо разделено на десять сегментов (в системе классификации эти части названы секторами), в которые помещены следующие названия наиболее крупных типовых составных частей турбин и ее документации:

0 — общие виды агрегатов, эскизные и технические проекты, технические документы;
1 — парораспределение и клапаны;
2 — статор турбины;
3 — ротор и облопачивание турбины;
4 — регулирование турбины;
5 — редукторы и вспомогательное оборудование турбины;
6 — измерительные приборы, щитки, арматура;
7 — масляная система, трубопроводы;
8 — унифицированные детали;
9 — разные узлы и детали.

Наружное кольцо разделено на сто сегментов, по десять на каждый сектор. Они названы группами. Например, сектор 3 — ротор и облопачивание турбины — имеет следующие группы:

0 — рабочие лопатки, промежуточные тела и бандажи;
1 — сегмент направляющих лопаток колес скорости;
2 — направляющие лопатки, «проставки» и бандажи колес;
3 — диски и колеса в сборе;
4 — валы и цельнокованые роторы;
5 — роторы в сборе;
6 — муфты и прочие детали и т. д.

В классификаторе заложен ключ к системе выпуска рабочих чертежей.

Номер каждого чертежа состоит из трех частей. Например, для дисков турбин номер чертежа 133-С-078; турбина — 1-й класс, ротор — 3-й сектор, диски — 3-я группа, т. е. 133. С — формат средний; 078 — номер последовательности регистрации чертежей внутри группы.

При таком порядке нумерации чертежей и хранения их по группам конструктор и технолог могут рассмотреть все аналогичные детали, не прибегая к просмотру громоздких архивов для подбора однотипных деталей, что имеет место при порядковой нумерации чертежей. Создается возможность при конструировании новых турбин широко использовать ранее выпускавшиеся детали без изменения или с сохранением формы и размеров отдельных элементов этих деталей; создается основа для типизации технологических процессов.

Установление единой классификации изделий и их элементов во всех отраслях машиностроения значительно повысит уровень преемственности работ по проектированию различных машин и их элементов (деталей, сборочных единиц и т. д.), а также по разработке технологических процессов и технологической оснастки всех видов. Это дает большую экономию материальных средств и значительно ускорит как проектирование изделий в машиностроении, так и весь процесс подготовки их производства.

Это облегчит также планирование и организацию производства во всем машиностроении в целом, улучшит условия для кооперирования предприятий и обмена опытом между ними, повысит мобильность производства и создаст необходимую базу для широкого применения станков с числовым программным управлением, т. е. обеспечит возможность создания и хранения стандартных программ для обработки идентичных элементов машин.

В целом создание единого классификатора для обозначения элементов машин будет иметь большое народнохозяйственное значение. Поэтому в настоящее время организации Госплана СССР совместно с организациями Госстандарта СССР и при деятельном участии организаций и предприятий отраслевых машиностроительных министерств разрабатывают общесоюзный единый классификатор для обозначения машиностроительных изделий и их элементов. В частности, уже разработан и находится в промышленности для изучения и опытной проверки общесоюзный классификатор промышленной продукции (ОКП).

Однако этот классификатор еще не решает всех вопросов детальной классификации элементов машин как с конструктивной, так и, особенно, с технологической точки зрения. Работа по созданию единых конструктивных и технологических классификаторов в машиностроении продолжается, но она является исключительно сложной, и поэтому отраслевые классификаторы и классификаторы предприятий еще долго будут необходимы.

2. Элементы технологических процессов

Под технологией машиностроения принято понимать учение о процессах изготовления деталей и сборки из них машин и механизмов.

Технологическим процессом изготовления детали называют совокупность всех частей производственного процесса, непосредственно связанных с изменением формы, состояния или свойства материала изготовляемой детали от момента поступления его на обработку до получения готовой детали.

Технологический процесс изготовления детали состоит из двух взаимосвязанных частей: технологического процесса изготовления заготовки и технологического процесса обработки детали. При использовании покупных заготовок на данном предприятии осуществляется только технологический процесс обработки соответствующих деталей.

Полный технологический процесс обработки детали состоит из механической обработки, а также всех сопутствующих ей операций, таких как разметка, контроль качества, промежуточная термообработка и др. Технологический процесс обработки складывается из ряда отдельных операций, характеризуемых определенными методами обработки деталей, например токарной, фрезерной, термической обработкой и т. п.

Операцией называется законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте одним или несколькими рабочими (т. е. бригадой) с помощью определенного оборудования и оснастки.

Рабочим местом называется часть площади цеха, предназначенная для выполнения определенных работ, на которой размещены соответствующее технологическое оборудование, оснастка, подъемно-транспортные устройства, стеллажи для хранения заготовок деталей или сборочных единиц и другие необходимые средства выполнения данных работ.

Целесообразность деления технологического процесса на операции вызывается техническими и экономическими соображениями. К ним относится, например, техническая невозможность выполнения всей обработки детали на одном рабочем месте или на одном только станке определенного типа. Так, на токарном станке нельзя выполнить фрезерных операций и т. д. По экономическим соображениям также зачастую оказывается невыгодным выполнять всю работу на одном станке (например, проводить черновую и чистовую обработку крупного вала), так как при этом нерационально используется станок, инструмент и квалификация рабочего. Следует учитывать также то, что при отделении грубой обработки от чистовой станок, постоянно занятый лишь чистовой и отделочной обработкой, будет меньше изнашиваться и поэтому дольше сохранит высокую точность обработки. Для станков черновой обработки потеря точности

не имеет такого большого значения. Поэтому в целом система из двух станков для раздельной черновой и чистовой обработки будет служить гораздо дольше, чем система из таких же двух станков, применяемых для полной обработки деталей, т. е. для черновой и чистовой обработки на одном и том же станке.

Технологическая операция является основным элементом производственного планирования и учета. На выполнение определенных операций обычно рабочему выписывается наряд. В соответствии с операциями технологических процессов разрабатывается вся планировочная и учетная техническая документация, составляются различные производственные графики и ведомости. Операции служат основанием для расчета трудоемкости изделия, потребного количества станков (по размерам и видам), а также рабочих, по их специальностям и квалификации. Операция, в свою очередь, состоит из нескольких элементов.

Для технологического процесса механической обработки основными элементами операции являются: переход, проход, установка и позиция. Деление операций на такие элементы необходимо для более тщательного изучения процесса и уточнения расчетов трудоемкости обработки деталей.

Переходом называется часть операции, осуществляемая при обработке одной и той же поверхности, одним и тем же режущим инструментом, или набором нескольких одновременно работающих инструментов, без изменения режима резания. Например, обработка точного отверстия в детали при помощи сверла, зенкера и развертки, т. е. трех последовательно работающих инструментов, представляет собой обработку в три перехода. К переходам механической обработки деталей относятся и такие законченные элементарные части технологической операции, как установка и закрепление детали в приспособлении, ее открепление и снятие.

Проходом называется однократное перемещение режущего инструмента по обрабатываемой поверхности, сопровождаемое съемом слоя металла, при неизменной установке инструмента и неизменном режиме резания. Переходы делят на проходы, когда нельзя с одного раза, т. е. за один проход, снять весь слой металла, подлежащий удалению. Например, при обдирке поковки вала турбины надо снять с какой-нибудь из поверхностей заготовки слой металла толщиной 30 мм; при этом допустимая глубина резания равна 10 мм. Следовательно, указанный слой может быть снят лишь за три прохода. Все проходы, если их в данном переходе несколько, характеризуются неизменностью режима и условий работы. Если при точении той же поверхности вала изменяется, например, режим работы, инструмент и т. п., то это будет новый переход.

Установкой называют часть операции, связанную с необходимостью выверки и закрепления детали под обработку в приспособлении или непосредственно на столе станка. Установка

характеризуется неизменностью положения детали в процессе обработки. Если при выполнении операции потребуется изменить положение детали с новой выверкой и перезакреплением ее на столе или в патроне станка, это будет уже следующая установка.

Позицией называется каждое новое положение детали, закрепленной неизменно в приспособлении, установленном на поворотном столе многошпиндельного станка для последовательной обработки ее несколькими режущими инструментами, например на многошпиндельном токарном автомате последовательного действия модели 123. Каждое новое положение детали после перемещения ее под следующий шпиндель путем поворота стола станка без перезакрепления детали будет позицией.

При подробном изучении технологических процессов с целью их рационализации и получения исходных данных о целесообразных затратах времени на выполнение той или иной операции, последнюю приходится делить на отдельные элементарные действия, совершаемые рабочим при ее выполнении. Каждое из таких действий называют *приемом*. Так, например, операция по сверлению на станке отверстия в какой-нибудь детали может состоять из следующих приемов: очистки приспособления от стружки (после обработки предыдущей детали); установки детали в приспособление; закрепления детали; включения станка; открепления детали; снятия детали с приспособления. Как видно из этого примера, многие приемы при выполнении станочных операций являются вспомогательными действиями.

На основе изучения времени, затрачиваемого рабочим на выполнение отдельных приемов, и надлежащей математической обработки полученных данных разрабатываются различного рода нормативные графики и таблицы вспомогательного времени, используемые для нормирования ручных процессов при выполнении станочных операций. Подобным же образом производится подробное изучение и анализ сборочных и других работ, в которых преобладает непосредственно ручной труд. В этом случае приемы будут относиться не к вспомогательным, а к основным рабочим действиям, направленным на исполнение той или иной конкретной операции технологического процесса обработки определенной детали или сборки той или иной сборочной единицы.

Глава III. ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1. Изучение конструкции объекта

Технологический процесс изготовления машины складывается из технологических процессов изготовления деталей и технологических процессов сборки, контроля и испытания этой ма-

шины. Задачей каждого технологического процесса является наиболее экономичное и качественное изготовление машины при наиболее рациональном использовании средств производства. В соответствии с этой задачей до начала разработки технологических процессов изготовления новой машины технологи должны хорошо ознакомиться с ее служебным назначением, работой ее отдельных узлов и деталей, подробно изучить особенности новой конструкции и технические условия на изготовление и испытание машины и ее частей.

Изучение новой машины должно сопровождаться критическим анализом чертежей с точки зрения технологичности конструкции, которая, в принципе, должна обеспечиваться уже в процессе проектирования новой машины, о чем было сказано ранее. При изучении готовой конструкции необходимо вновь рассмотреть вопросы о возможности использования при изготовлении деталей и сборке машины наиболее экономичных и технически совершенных методов обработки, сборки, измерений, контроля и испытаний, обеспечивающих высокое качество изготовления машины в конкретных производственных условиях. При этом должен всесторонне анализироваться весь комплекс вопросов, связанных с технологией производства.

При анализе чертежей обнаруживаются примеры необоснованного завышения норм точности на изготовление определенных элементов машин, и, наоборот, имеются случаи, когда с точки зрения качественной и экономичной сборки машины точность изготовления некоторых деталей требуется повысить; нередко выявляется также необходимость уточнения или изменения конструкции отдельных элементов с целью создания условий для наиболее рациональной механической обработки и сборки. При рассмотрении технологами чертежей в них обнаруживаются и прямые ошибки, однако такой, чисто конструктивный, контроль чертежей не может входить в прямые обязанности технологов и поэтому производится лишь попутно.

Изучение и критический анализ конструкции целесообразно осуществлять не после полного окончания разработки чертежей, а в течение всего процесса конструирования новой машины, в порядке творческого содружества конструкторов и технологов. Такой порядок исключает случаи коренных изменений конструкции в процессе отработки технологических процессов.

2. Последовательность разработки технологических процессов изготовления машины

Наиболее целесообразной последовательностью разработки технологических процессов изготовления новой машины необходимо признать следующую: разработка технологических процессов сборки и разработка технологических процессов механической обработки.

При указанной последовательности более рационально расходуется время на изучение конструкции машины, проведение критического анализа технических условий на изготовление деталей и сборку технологических узлов и сборочных единиц; полнее выявляются недостатки конструкции как с точки зрения технологии сборки машины, так и с точки зрения механической обработки ее деталей.

Указанная последовательность позволяет уже на раннем этапе разработки технологических процессов выявить многие недостатки конструкции и исправить их до начала разработки технологических процессов механической обработки. Одновременно при разработке технологических процессов сборки и анализа размерных цепей выявляются все основные требования технологии сборки к технологии механической обработки деталей. В таком случае в технологии механической обработки будут полностью учтены как требования конструкции, так и условия производства.

3. Общие принципы разработки технологических процессов механической обработки

Разработка технологического процесса обработки детали представляет собой решение сложной комплексной задачи, основными составляющими которой являются: выбор технологического процесса изготовления заготовки, разработка маршрута, т. е. последовательности обработки различных поверхностей детали, выбор способов обработки каждой поверхности, расчет припусков, допусков и т. п. В соответствии с основной целью требуется найти оптимальный для данных производственных условий вариант перехода от полуфабриката, поставляемого обычно металлургической промышленностью, к готовой детали. Выбранный оптимальный вариант должен обеспечить наиболее низкую себестоимость изготовления детали.

Для разработки технологических процессов обработки деталей технолог должен иметь следующие исходные данные и материалы:

а) сборочные и рабочие чертежи изделия, сборочных единиц и деталей;

б) технические условия, нормы точности и другие данные, характеризующие служебное назначение обрабатываемых деталей в работающей машине;

в) требования к деталям, выявленные при разработке технологического процесса сборки;

г) чертежи получаемых со стороны заготовок (РЧЗ) и полуфабрикатов;

д) стандарты и нормали на размеры и допуски для заготовок собственного производства;

е) типовые и рабочие технологические процессы обработки основных видов деталей;

ж) технологические характеристики заводского оборудования (паспорта станков и др.);

з) стандарты и нормали режущих и измерительных инструментов и типовых универсальных приспособлений;

и) альбомы применяемых специальных приспособлений и инструментов;

к) справочные и руководящие внутризаводские, отраслевые и межотраслевые материалы, а также специальную литературу.

При проектировании операций механической обработки технологом решаются следующие основные задачи:

а) выбор модели станка;

б) определение способов базирования и закрепления заготовки;

в) составление, в необходимых случаях, эскизов или схем установки деталей и их обработки;

г) определение технологических переходов и инструментов (режущих и измерительных) для их выполнения;

д) определение режимов резания;

е) установление квалификационных разрядов работы;

ж) расчет норм времени на выполнение операций;

з) разработка заданий на проектирование специальных инструментов и приспособлений.

При построении отдельных операций необходимо обращать особое внимание на возможность:

а) сокращения длины рабочего и холостого хода инструмента;

б) совмещения машинного и вспомогательного времени;

в) разделения обработки на черновые и чистовые проходы;

г) применения комбинированных инструментов;

д) применения многоинструментальных наладок;

е) применения приспособлений, облегчающих труд рабочего и повышающих общую эффективность процесса обработки детали;

ж) механизации и автоматизации процессов;

з) многостаночного обслуживания групп станков;

и) обязательного выполнения требований техники безопасности и охраны труда.

Учет всех указанных факторов позволяет технологу наиболее правильно, в каждом конкретном случае, подойти к формированию технологических операций. Подробно примеры формирования операций рассматриваются ниже в разделах механической обработки типовых и характерных турбинных деталей.

Технологический процесс изготовления каждой детали можно спроектировать в нескольких вариантах, обеспечивающих выполнение заданных технических условий. Выбор наиболее экономичного варианта производится сопоставлением технико-эко-

номических показателей, характеризующих сравниваемые варианты. Полную оценку вариантов можно получить, сравнивая их себестоимости. Условие наименьшей себестоимости технологического процесса изготовления детали (или выполнения отдельной его операции) является основным критерием оценки целесообразности всего технологического процесса или отдельной его операции.

Для расчета себестоимости может быть рекомендована следующая формула:

$$C = M + \sum_{i=1}^{n} \left[O + П + И + \left(1 + \frac{a_1 + a_2}{100}\right) З \right],$$

где C — себестоимость детали в руб.;
M — стоимость заготовки в руб.;
O, $П$, $И$ — расходы на амортизацию оборудования, приспособлений или другой технологической оснастки и инструментов, приходящиеся на одну операцию, в руб.;
a_1 — начисления по заработной плате на социальные расходы в %;
a_2 — накладные расходы в %;
n — количество операций технологического процесса;
$З$ — заработная плата в руб.

Как видно из формулы, себестоимость складывается из затрат овеществленного (материал, оборудование, оснащение) и живого (заработная плата) труда. Условием целесообразности выбранного варианта технологического процесса является меньшая сумма затрат обоих видов труда.

В качестве заготовок могут использоваться сортовой прокат, поковки, штамповки и другие виды полуфабрикатов. Оборудованием может служить (например, при обработке плоскостей детали) фрезерный, строгальный, расточной или даже специальный станок с программным управлением. Приспособление может быть с ручным или механизированным, пневматическим или гидравлическим креплением заготовки.

Стоимость заготовок каждого вида, станков и оснащения различная. Высокая стоимость специального оборудования или специальной сложной оснастки будет оправданной при значительном повышении производительности труда в результате их применения, а следовательно, при соответствующем сокращении расходов на зарплату. Стоимость амортизационных расходов и стоимость материалов определяется по данным предприятия.

4. Последовательность обработки

Обработку детали ведут в определенной последовательности, которая зависит от следующих основных факторов: конструкции детали; ее размеров и формы; технических требований к изго-

товлению детали; вида и точности заготовки; технических условий на материал заготовки и др.

Точность принятой заготовки, технические условия на материал и технические требования, предъявляемые к детали, определяют общее построение и содержание технологического процесса механической обработки и расчленение его на этапы черновых, чистовых и отделочных операций.

При использовании литых заготовок и особенно заготовок для крупных деталей (например, цилиндров турбин), обработка которых связана с выполнением большого количества весьма трудоемких и сложных операций, в первую очередь производят обдирку их поверхностей и только после этого приступают к чистовым и отделочным операциям. Это позволяет своевременно выявить и исправить литейные дефекты отливки (поры, трещины, раковины) или же забраковать отливку на более ранней стадии обработки.

При изготовлении крупных деталей из горячего проката, поковок и штамповок, имеющих обычно значительные припуски, также целесообразно выделять этапы черновой обработки. Выполнение черновой обработки для снятия основной части припуска позволяет в этом случае более целесообразно использовать оборудование и квалификацию работающих.

Если по техническим условиям на материал требуется проведение закалки и отпуска, то механическую обработку делят на два этапа: первый — предварительный — выполняют перед термической обработкой и второй — окончательный — после нее. Отделочные операции производят обычно в самом конце технологического процесса.

Чистовую обработку детали следует начинать с обработки тех поверхностей, при помощи которых деталь присоединяется к другим деталям машины и занимает в отношении их требуемое положение, или, иначе говоря,— с поверхностей, являющихся обычно конструкторскими базами детали. Желательно, чтобы эти поверхности были одновременно и конструкторскими, и установочными, и измерительными базами.

Конструкторскими базами называются поверхности, от которых на чертеже поставлены размеры до других обрабатываемых поверхностей. В качестве конструкторских баз часто принимаются не материальные поверхности, а осевые линии валов, отверстий и т. п. При обработке детали их заменяют установочными базами, выбираемыми по усмотрению технолога, в зависимости от конкретных условий обработки детали.

Установочными базами называются поверхности деталей (заготовок), ориентирующие их при установке под обработку относительно режущих инструментов.

Измерительными базами называются поверхности, от которых проводится измерение расстояний до обрабатываемых поверхностей. Для деталей типа тел вращения — роторов, валов, осей

и других подобных деталей, конструкторскими базами которых являются осевые линии, последние материализуют, применяя в качестве установочных (технологических) баз центровые отверстия. Обработку таких деталей начинают с подготовки центровых отверстий.

При обработке деталей особо сложной формы, например рычагов или направляющих лопаток, поверхности которых в силу их конструктивных особенностей не могут быть использованы в качестве базовых, технолог может предусмотреть в чертежах заготовок специальные технологические припуски для использования их в качестве места расположения базовых поверхностей. В конце окончательной обработки детали технологические припуски срезаются.

5. Выбор видов обработки

Выбор видов обработки отдельных поверхностей имеет большое значение для качественного и вместе с тем экономичного изготовления деталей. Как было уже сказано выше, черновые операции стремятся выполнять на отдельных менее точных станках. Однако в тяжелом машиностроении это не всегда удается осуществить, особенно при необходимости применения уникального оборудования. В таких случаях черновую и чистовую обработку приходится выполнять на одних и тех же станках, стремясь выделять станки хотя бы лишь для точной отделочной обработки.

Методы предварительной и отделочной обработки поверхностей в соответствии с техническими требованиями к качеству деталей определяют по специальным справочным руководствам, корректируя их сообразно конкретным условиям предприятия.

Поверхности, выбранные в качестве базовых, должны быть обработаны наиболее тщательно как с точки зрения геометрической формы и чистоты обработки, так и с точки зрения точности их взаимного расположения в пространстве. В ряде случаев технологические требования к точности расположения базовых поверхностей устанавливаются более жесткими, чем конструктивные требования к точности расположения этих поверхностей. Для их обработки следует применять чистовые операции (шлифование, чистовое и тонкое точение, шабрящее фрезерование и др.). В случае возможности применения нескольких видов обработки необходимо разрабатывать несколько вариантов технологических процессов и выбирать наиболее экономичный из них.

После выбора видов заготовок, составления маршрута обработки и выбора видов обработки поверхностей приступают к расчету припусков на обработку.

6. Припуски на механическую обработку

Припуском на обработку называют слой материала, удаляемый с поверхности заготовки в процессе полной ее обработки до получения готовой детали.

Промежуточным припуском называется слой материала, снимаемый в процессе выполнения отдельных технологических переходов или операций. Имеется много факторов, влияющих на размеры припусков. Укажем, в частности, на следующие из них.

Каждой черной заготовке, в зависимости от метода ее получения, присущи определенные погрешности и дефекты. К ним относятся: твердая поверхностная корка в литых заготовках; рванины, плены и закаты; трещины в поверхностном слое поковок и штамповок; обезуглероживание поверхностного слоя у проката и др.

В процессе механической обработки, при выполнении каждого перехода, образуются свои погрешности, характеризуемые отклонениями размеров обрабатываемых деталей, нарушениями правильности их геометрической формы, поверхностными микронеровностями (шероховатостью), различными пространственными отклонениями взаимосвязанных поверхностей деталей в виде, например, несоосности их отдельных элементов и т. п.

Для достижения высокого качества и точности размеров детали припуски на ее обработку должны иметь определенную минимальную величину, обеспечивающую полное удаление дефектов поверхностного слоя заготовок и погрешностей предыдущей обработки. Это требует весьма внимательного отношения к определению припусков.

При расчете необходимых припусков на обработку надо учитывать величину всех возможных отклонений, могущих иметь место на предыдущих операциях, чтобы не допустить брака деталей при выполнении последующей обработки. Так, например, недостаточная величина припуска, оставленного при чистовом точении заготовки под шлифование без учета возможных поводок детали при ее закалке, неизбежно приведет к появлению брака в виде следов предыдущей чистовой токарной обработки на окончательно обработанных шлифованных поверхностях детали.

Задача технолога заключается в назначении минимально необходимых припусков, обеспечивающих как высокое качество обрабатываемых деталей, так и рациональный расход металла. Существует два метода определения величины припусков: расчетно-аналитический и табличный.

Расчетно-аналитический метод определения величины припусков базируется на исходных данных, полученных в результате анализа производственных погрешностей, возникающих при различных условиях выполнения заготовок и их последующей обработки. По сравнению с определением величины припусков по

опытно-статистическим данным расчет обычно обеспечивает экономию металла до 15% от веса заготовок, снижение трудоемкости процессов последующей механической обработки и уменьшение расхода режущего инструмента. Однако расчетно-аналитический метод определения припусков отличается большой сложностью и трудоемкостью, вследствие чего его применение становится целесообразным только в массовом производстве, например при изготовлении крупных партий одинаковых деталей из мерного проката. Тогда создается возможность заказа металлургическому заводу партий мерного проката не по стандартным размерам, а по расчетным, что обеспечивает большую экономию металла. При этом следует иметь в виду, что транспортная норма заказа мерного проката обычно принимается не меньше 3000 кг.

В мелкосерийном производстве, например в таком, как стационарное турбиностроение, где имеет место чрезвычайно большое разнообразие типоразмеров деталей при их малой серийности, заказ специального мерного проката для отдельных типоразмеров деталей не представляется возможным. В этом случае применение расчетно-аналитического метода определения припусков становится нерациональным и теряет смысл. Поэтому в стационарном турбиностроении припуски назначаются по таблицам или внутризаводским нормалям соответственно виду обработки. Нахождение общего припуска производится по схеме расположения межоперационных допусков и припусков (рис. 1).

Расчет величины припусков рекомендуется производить в следующем порядке:

а) разработать маршрутный технологический процесс, определить обрабатываемые элементарные поверхности заготовки для каждой технологической операции и каждого перехода в порядке последовательности их выполнения; составить схему расположения межоперационных припусков и допусков;

б) определить припуски по каждому переходу согласно схеме и соответствующим справочным таблицам;

в) найти общий припуск согласно схеме.

Припуски на обработку заготовки отсчитывают от наименьшего предельного размера для наружных поверхностей готовых деталей и от наибольшего предельного размера — для внутренних.

Для наружных поверхностей (рис. 1, *а*)

$$d_{о_{min}} = d_{д_{min}} + z_о; \quad d_{о_{max}} = d_{о_{min}} + \delta d_о;$$

для внутренних поверхностей (рис. 1, *б*)

$$d_{о_{max}} = d_{д_{max}} - z_о; \quad d_{о_{min}} = d_{о_{max}} - \delta d_о,$$

где $d_{о_{min}}$ и $d_{о_{max}}$ — предельные размеры заготовки;

$d_{д_{min}}$ и $d_{д_{max}}$ — предельные размеры детали по чертежу;

z_0 — табличный припуск на механическую обработку заготовки;

δd_0 — допуск на размер заготовки.

Расчет общего припуска с учётом межоперационных припусков показан на рис. 1, *в*. Как видно из схемы, допуск детали $\delta d_д$ откладывается в тело припуска. Расчет припусков по приведенной схеме с использованием табличных величин общих и межоперационных припусков из технологических справочников дает наивыгоднейшие размеры заготовок.

При заготовках из проката технолог обязан, до записи полученных расчетных размеров в материальную ведомость, сверить результаты расчета с внутризаводскими ограничительными таблицами (сортаментом приобретаемого заводом проката) и выбрать из них прокат, наиболее близкий по своим размерам и форме к расчетному. При отсутствии в сортаменте такого проката технолог, составляя расцеховку, назначает поставщиком заготовки кузнечный цех завода.

7. Выбор заготовок

Основным направлением современного производства, которое необходимо учитывать конструктору и технологу при выборе заготовок, является максимальное приближение конфигурации и размеров заготовки к конфигурации и размерам готовой детали. Это направление требует непрерывного повышения точности и чистоты поверхности заготовок и позволяет соответственно сократить объем работ по обработке деталей резанием, порой вовсе исключая ее для некоторых поверхностей деталей или ограничивая ее чистовыми, отделочными операциями.

Высокая точность заготовок может быть достигнута путем совершенствования технологических процессов изготовления заготовок. Так, например, отливки могут выполняться в песчаные формы, кокили, скорлупчатые формы и с применением выплавляемых моделей. Поковки стальных деталей могут выполняться на ковочных молотах методом свободной ковки и с применением подкладных штампов и т. п. Эти примеры показывают, что выбор заготовки не может ограничиваться только определением вида заготовки, но должен дополниться еще и установлением процесса ее получения. Последнее осуществляется технологами механических цехов совместно с технологами заготовительных цехов.

Основными видами заготовок, применяемых в турбиностроении, являются отливки из черных и цветных металлов; кованые и штампованные заготовки; сварные заготовки из листовой стали; заготовки из проката. Так, например, для изготовления корпусных деталей турбин в качестве заготовок в основном используются стальные и чугунные отливки; для изготовления выхлопных частей — сварные заготовки из листовой стали.

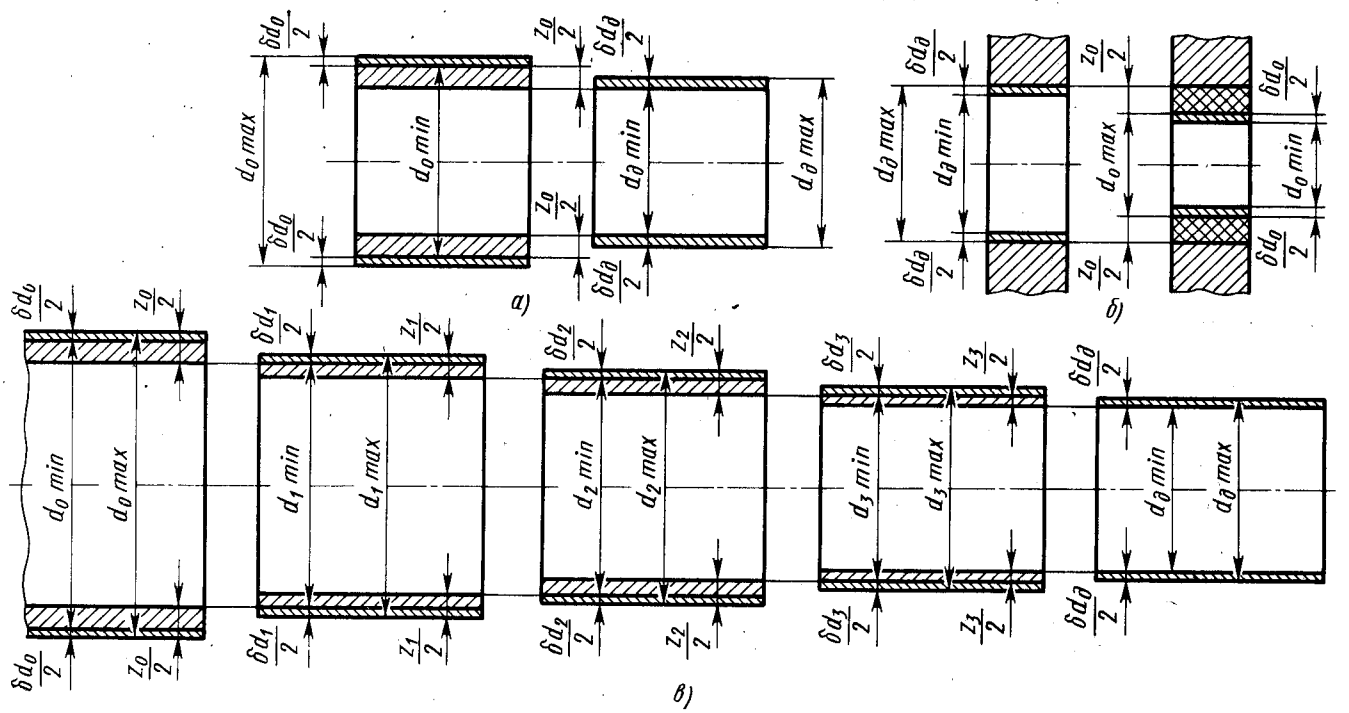


Рис. 1. Схема расположения межоперационных припусков и допусков

В качестве заготовок для валов, цельнокованых роторов, дисков и других крупных турбинных деталей применяются поковки из слитков, поставляемые турбинным заводам металлургическими предприятиями по кооперации. Для крупных лопаток применяются штампованные заготовки. Для мелких и средних деталей турбин применяются заготовки из проката или поковки из проката, полученные методом свободной ковки. Последнее относится к большинству деталей, изготовляемых из легированных сталей. Многие из них можно изготовлять непосредственно из мерного проката, однако ввиду малой серийности турбин обеспечить получение мерного проката для всего многообразия типоразмеров деталей не представляется возможным. Турбинным заводам в таких случаях приходится приобретать прокат по размерам наибольших деталей, а для более мелких (с целью уменьшения припусков на механическую обработку) изготовлять поковки своими силами, в основном методом свободной ковки.

Выбор заготовок практически начинается уже в процессе конструирования деталей. В первую очередь это касается корпусных деталей и деталей сложной конфигурации типа рычагов, рукояток, маховиков и зубчатых колес, имеющих поверхности, не поддающиеся обработке резанием, которые исходя из их служебного назначения могут оставаться в деталях необработанными. Заготовки для указанных деталей могут быть получены различными способами (отливкой, штамповкой, сваркой, комбинацией отливки, штамповки и сварки и т. п.). Знание вида заготовки, технологии ее изготовления, а также процесса последующей механической обработки детали крайне необходимо конструктору для обеспечения технологичности ее конструкции и наилучшего использования в работающей машине.

При выборе заготовок возможны следующие случаи.

Первый случай, когда заготовки по своим размерам и весу не могут быть изготовлены средствами самого турбиностроительного завода и должны поставляться на завод по кооперации. К таким заготовкам обычно относятся стальные отливки массой свыше 2 т; чугунные — свыше 3 т; поковки весом свыше 250 кг; штампованные заготовки для лопаток и других деталей; слитки. Конструктор турбины в этом случае указывает марку материала и технические условия, определяющие химический состав материала, твердость и особые требования к механическим свойствам материала заготовки. Размеры же заготовки (в части установления размеров припусков на обработку) и технологию изготовления заготовки обычно определяет поставщик в соответствии со своими технологическими возможностями. Для согласования с заказчиком, т. е. с турбиностроительным заводом, поставщик разрабатывает рабочий чертеж заготовки (РЧЗ), в котором указывает для поковок из легированных сталей (например, для валов турбин) размеры черной заготовки, размеры заготовки под термообработку и припуски для проб на механи-

ческие испытания; для литых заготовок и штамповок — литейные и штамповочные уклоны и т. п. РЧЗ поставщик рассматривает и согласовывает с конструкторами и технологами завода-заказчика, после чего, в случае необходимости, корректируется и чертеж самой детали.

Второй случай, когда детали имеют много поверхностей, не требующих механической обработки, а заготовки для этих деталей возможно изготовить литыми, сварными или штампованными на самом турбиностроительном заводе. Вопрос о выборе заготовок в таком случае решается конструктором совместно с технологами заготовительного и механического цехов, после чего, соответственно выбранной заготовке, оформляется чертеж самой детали.

Третий случай, когда все поверхности детали должны механически обрабатываться, но к ней не предъявляется особых требований с точки зрения вида заготовки. В этом случае конструктор указывает на чертеже лишь марку материала, термическую обработку и необходимую твердость, но не указывает характера заготовки. Выбор заготовки целиком предоставляется технологам.

Рассмотренные здесь примеры, конечно, не могут охватить всех практически возникающих в процессе проектирования и изготовления турбин случаев, поэтому всегда необходимо конкретно рассмотреть как конструктивные требования к деталям, так и технологические особенности изготовления заготовок.

8. Понятие о технологической дисциплине

Технологические процессы разрабатываются с учетом применения наиболее прогрессивных высокопроизводительных методов обработки, обеспечивающих заданные технические требования к качеству изготовляемых машин, при наиболее рациональном использовании оборудования и с применением необходимых приспособлений и инструментов. Отклонение от разработанного и утвержденного технологического процесса, как правило, ведет к ухудшению качества изделий и снижению технико-экономических показателей производства.

Недопустимость отклонений от установленных технологических процессов станет еще более ясной, если учесть, что ими предусматривается строго определенная последовательность выполнения операций обработки деталей, при которой на каждой из предыдущих операций заготовке придаются определенные размеры и форма, учитываемые в конструкции специальных приспособлений и инструментов, применяемых при выполнении последующих операций. Отклонение от установленной последовательности, если оно даже и не приведет к полному браку деталей, может дезорганизовать производство и исключить воз-

можность дальнейшей обработки деталей по разработанной технологии. Особенно недопустимы неоправданные отклонения от установленных технологических процессов в массовых и крупносерийных производствах, где детали изготовляются десятками и сотнями тысяч штук в партии.

В турбиностроении при исключительно высоких требованиях к качеству и точности деталей, особенно крупных (роторов, дисков, цилиндров и т. п.), обработка по установленной технологии является строго обязательной. Иначе говоря, в турбинном производстве необходимо полное соблюдение технологической дисциплины.

С целью контроля систематически производятся проверки соблюдения технологии, состояния станков, порядка на рабочих местах, состояния технологического оснащения.

Акты проверки подписывают технолог, контролер ОТК, мастер, рабочий.

Необходимость строгого соблюдения технологической дисциплины ни в коем случае не должна пониматься так, как будто бы установленная однажды технология остается неизменной в течение всего времени производства данных машин. Такое положение было бы глубоко неправильным, так как оно тормозило бы развитие техники производства. На самом деле, технология непрерывно совершенствуется и изыскиваются новые, более целесообразные и эффективные методы. Это относится как к основным теоретическим положениям этой науки, так и к каждому практически используемому на предприятиях технологическому процессу.

Таким образом, понятие о технологической дисциплине состоит не в утверждении абсолютного постоянства определенного процесса, а в том, чтобы все необходимые совершенствования, в том числе и предлагаемые часто самими рабочими, вносились в эти процессы только после всестороннего рассмотрения и утверждения их в установленном на предприятии порядке. Утвержденный же в таком порядке технологический процесс должен соблюдаться неукоснительно.

Глава IV. ТИПИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Под типизацией технологических процессов понимается разработка типовых технологических процессов на изготовление технологически однородных деталей (например, дисков, диафрагм, валов турбин и т. п.) с учетом новейших достижений науки и техники и передового опыта промышленных предприятий.

Идея типизации технологических процессов возникла в Советском Союзе в 1932—1935 гг., когда началось бурное развитие

отечественного машиностроения и потребовалось быстро и качественно разрабатывать технологические процессы для производства большого количества новых разнообразных машин. Одним из инициаторов типизации технологии был паротурбинный цех ЛМЗ.

Применение типовых технологических процессов позволяет резко сократить сроки и стоимость подготовки производства новых изделий, обеспечивая значительное повышение ее технико-экономической эффективности.

Первым этапом типизации является классификация деталей по общности методов решения технологических задач их изготовления. Классификация является наиболее трудоемкой частью работы. Для проведения классификации выбирается типовая машина — одна из изготовляемых предприятием, с наибольшей серийностью. Все чертежи данной машины группируются по однородности их конструктивных и технологических признаков (например, в турбине — диски, диафрагмы, рабочие и направляющие лопатки и т. п.).

Как показал опыт машиностроения, наиболее правильным признаком для классификации машин, сборочных единиц и деталей является одинаковое или близкое их служебное назначение. В соответствии с этим, классом можно назвать совокупность изделий (машин, сборочных единиц или деталей), обладающих одинаковым или близким служебным назначением.

Сходство служебного назначения порождает сходство требований, которым должна отвечать готовая деталь, сборочная единица или машина в целом. Это порождает близость кинематических схем, конструктивных форм и размеров и других качественных показателей. Рассмотрим к примеру в турбине детали ротора, детали узлов регулирования, парораспределения, проточной части. Все эти узлы и детали выполняют сходные функции, работают в сходных условиях окружающей среды (температура, степень нагружения и т. п.). Это несомненно приводит к необходимости применения для них, в соответствии с назначением, однотипных форм, материалов и т. п. В качестве удачного решения задачи по классификации деталей можно привести, например, рассмотренную выше классификацию Калужского турбинного завода.

Результатом первого этапа работы по типизации технологии должен явиться классификатор — альбом эскизов типовых деталей, расположенных в определенной последовательности. Наличие классификатора облегчает отнесение деталей по вновь поступающим на разработку чертежам к тому или иному классу.

Работа по классификации деталей сопровождается унификацией и стандартизацией их конструкций, которые должны охватывать не только детали в целом, но и их элементы (галтели, выкружки, канавки и т. п.). Степень унификации и стандартизации сборочных единиц и деталей машин может в определенной

мере и при определенных условиях служить показателем качества работы конструктора.

Задача технологов — работать в тесном содружестве с конструкторами, помогать им в создании более совершенных типовых технологичных и унифицированных конструкций элементов машин. Так, например, на ЛМЗ в 1933—1934 гг., когда впервые приступили к разработке классификации деталей, при изучении чертежей насосов (циркуляционных, питательных, масляных), спроектированных в разное время различными исполнителями, с целью разделения деталей по классам и типам, было найдено много однотипных деталей, которые мало отличались по размерам друг от друга и вполне могли быть унифицированными. После обсуждения предложений технологов по унификации из 60 типоразмеров соединительных муфт, применяемых в насосах разного назначения и мощности, было оставлено только пять типоразмеров, без всякого ущерба для качества изделий. Унификация и стандартизация деталей и узлов однотипных машин, обеспечение при этом высокой технологичности конструкций, являются основной предпосылкой для организации эффективной и высококачественной технологической подготовки производства и совершенствования технологических процессов на базе их типизации. Сокращение числа типоразмеров позволяет укрупнить партии деталей и применить для их обработки методы крупносерийного производства даже при единичном производстве машин в целом, что особенно относится к турбиностроению. Нормализация конструктивных элементов деталей способствует сокращению номенклатуры режущих и измерительных инструментов.

Следующим этапом является разработка общего технологического процесса обработки типовых деталей, при котором устанавливаются типовая последовательность операций, типовые методы обработки, типовые конструкции технологической оснастки и другие условия.

Типизация технологических процессов особенно эффективна на заводах тяжелого машиностроения в условиях большой номенклатуры изделий и длительных сроков подготовки производства. В настоящее время идея типизации получила большое развитие в трудах С. П. Митрофанова при разработке принципа групповой обработки деталей, который является одним из наиболее эффективных путей совершенствования технологии машиностроительного производства.

Вот характеристика группового метода, данная автором научного обоснования этого метода — С. П. Митрофановым: «Групповой метод производства есть такой метод унификации технологии производства, при котором для групп однородной по тем или иным конструктивно-технологическим признакам продукции устанавливаются высокопроизводительные методы обработки с использованием однородных и быстро переналаживае-

мых приспособлений и инструментов и при этом обеспечивается быстрота и экономичность производства, его подготовки и переналадки».

Разрабатываемая в настоящее время совместно многими машиностроительными министерствами Единая система технологической подготовки производства в машиностроении и приборостроении в значительной степени основывается на разработке классификации деталей и типизации технологических процессов их обработки.

Глава V. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

1. Точность обработки

Точность обработки характеризуется степенью отклонения фактических размеров обработанной детали от номинальных, а также величиной отклонений от установленной геометрической формы и смещений отдельных элементов детали от их правильного взаимного расположения. Чем больше величина отклонений фактических размеров от номинальных, тем меньше точность обработки деталей.

Практика показывает, что, какие бы специальные меры ни были приняты, при механической обработке партии деталей оказывается невозможным получить абсолютно одинаковые размеры элементов всех деталей партии. Причиной этого является непостоянство условий обработки. Например, при развертывании ряда отверстий одной разверткой условия обработки каждого отверстия будут неодинаковыми. Первое отверстие обрабатывается только что заточенной разверткой, а последующие — уже бывшей в работе. Развертка постепенно изнашивается и каждое последующее отверстие обрабатывается все более притупленным инструментом. Ясно, что фактические размеры обработанных отверстий также будут постепенно изменяться по мере притупления инструмента. Вместе с тем будет изменяться и шероховатость обработанных поверхностей отверстий.

Сказанное справедливо как для обработки партии деталей, так и для обработки любой поверхности одной детали. Например, при точении наружной поверхности длинного вала по мере износа резца диаметр вала будет постепенно увеличиваться, вследствие чего форма вала окажется не цилиндрической, а конической (рис. 2, *а*). То же (рис. 2, *г*) будет иметь место и при расточке отдельных отверстий.

На точность размеров и формы детали в процессе ее обработки влияют многие различные причины. Среди них в первую очередь можно указать на следующие: неточность и недостаточ-

ная жесткость элементов станка; неточность и нежесткость режущих инструментов и приспособлений; износ режущих инструментов и приспособлений; неравномерность припуска и неоднородность материала заготовок; неправильно установленные режимы резания и связанные с этим большие силовые и температурные деформации детали и инструмента; колебания и деформации упругой системы СПИД (станок — приспособление — инструмент — деталь), вызываемые взаимодействием указанных выше и ряда других причин. На точность изготовления де-

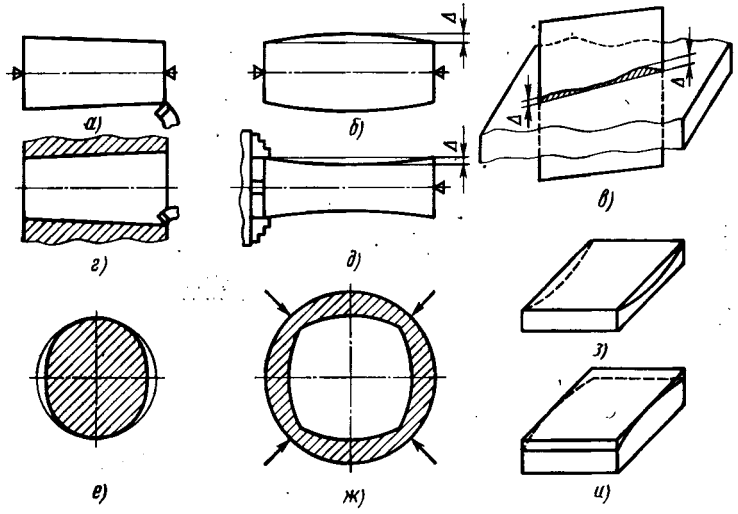


Рис. 2. Наиболее часто встречающиеся погрешности формы при обработке деталей:

а — и — виды погрешностей; Δ — отклонения

тали влияют также точность применяемых измерительных средств и самого процесса измерения.

Наиболее часто встречающиеся погрешности формы при обработке цилиндрических и плоских деталей показаны на рис. 2, *а — и*. Если в чертежах нет специальных указаний, величина погрешностей допускается в пределах всего поля допуска на заданный размер обработанной детали. Более высокие требования должны быть особо оговорены в чертеже.

Точность формы детали тесно связана с технологией ее обработки главным образом на отделочных операциях. Различный отжим резца в середине и у концов вала при точении его в центрах (рис. 2, *б*) приводит к бочкообразности. Нагрев вала в процессе точения приводит к седловидности (рис. 2, *д*), обнаруживаемой после его остывания. Овальность вала (рис. 2, *е*) может явиться следствием различного отжима по осям вала из-за неравномерного припуска или из-за неоднородности структуры

заготовки. Огранка в отверстии кольца (рис. 2, *ж*) образуется вследствие деформации кольца при его закреплении под обработку отверстия в четырехкулачковом патроне. Погрешности формы плоских деталей (рис. 2, *з*, *и*) могут быть, например, следствием неточности и недостаточной жесткости станка, деформации детали при закреплении под обработку, неравномерности припуска и неоднородности материала заготовки.

Достижение требуемых показателей точности обработки на каждой технологической операции определяется тщательностью проведения этой операции, качеством применяемых приспособлений, степенью жесткости станка и инструмента, точностью и сроками выполнения подналадок оборудования, величиной подач и скоростью резания, толщиной снимаемой стружки.

Для обеспечения требуемой точности при обработке поверхностей детали резанием технология должна строиться по принципу постепенного приближения формы детали к теоретической путем выполнения ряда операций, из которых каждая последующая производится с меньшей глубиной резания, меньшей подачей и меньшим усилием. В результате этого неизбежные деформации узлов металлорежущих станков, инструмента и самих деталей в процессе обработки становятся с каждой последующей операцией меньшими, и точность формы и размеров обрабатываемой детали возрастает.

Для исключения температурных деформаций следует работать с охлаждением, что одновременно уменьшает износ инструментов и повышает чистоту обработки. Сокращение погрешностей взаимного расположения поверхностей детали достигается путем надлежащей подготовки базовых поверхностей и правильного базирования деталей при обработке.

Важным мероприятием для снижения деформации деталей является хорошо продуманное и правильно осуществленное крепление их в процессе обработки, не допускающее пережимов и исключающее появление изгибающих моментов, о чем подробнее говорится в следующем разделе.

2. Основы базирования деталей в процессе их обработки

Установка заготовок для обработки на станке включает их базирование и крепление. В процессе базирования заготовке придается определенное положение относительно обрабатывающих инструментов; в процессе крепления обеспечивается неизменность ее положения во время обработки.

Для базирования используют отдельные поверхности или сочетания нескольких поверхностей детали, имеющие среди других, как правило, наибольшую ширину и протяженность [1].

---

[1] И здесь, и далее под понятием «поверхности» имеются в виду как отдельные поверхности, так и сочетания нескольких поверхностей.

Поверхности заготовки, ориентирующие ее при установке для обработки, называют *установочными базами*; поверхности, от которых заданы выдерживаемые при обработке размеры,— *измерительными базами*. Желательно, чтобы эти поверхности совпадали и с конструкторскими базами. Поверхности, выбранные в качестве установочных баз, должны быть обработаны в самом начале процесса.

Выбору баз должно предшествовать тщательное изучение чертежа детали с анализом служебного назначения каждой из ее поверхностей в работающей машине. Обычно все поверхности деталей машин по их служебному назначению можно разделить на следующие четыре вида.

Первый вид — *исполнительные поверхности*, при помощи которых машина, сборочные единицы или отдельные детали выполняют свое служебное назначение. У лопаток турбины к этому виду следует отнести поверхности рабочих частей, которые предназначены для преобразования тепловой энергии пара или газа в механическую работу.

Второй вид — *базирующие поверхности*, или, иначе говоря, основные *конструкторские базы* детали. Это поверхности, при помощи которых деталь присоединяется к другим деталям машины и занимает в отношении их требуемое положение. Например, у турбинных лопаток — это поверхности хвостов. Такие поверхности играют наиболее ответственную роль, определяя требуемое положение детали в машине или, иначе говоря, положение всех остальных поверхностей детали, образующих ее конструктивные формы.

Третий вид — *вспомогательные поверхности* детали. Это поверхности, при помощи которых деталь определяет положение всех других присоединяемых к ней деталей, а тем самым и относительное положение этих деталей в машине. Такими поверхностями у лопаток будут, например, поверхности шипов у головок, предназначенные для крепления бандажей и определяющие положение бандажей на рабочем колесе турбины, или отверстия в рабочей части для установки скрепляющей проволоки.

Четвертый вид поверхностей — *свободные*. К ним относятся поверхности, свободные от сопряжения с другими деталями. Их назначение заключается в соединении между собою поверхностей первых трех видов и придание совместно с ними необходимых конструктивных форм детали.

Требования к точности размеров этих поверхностей обычно не регламентируется.

Анализируя служебное назначение отдельных поверхностей детали, технолог должен составить себе ясное представление о последовательности обработки детали и о поверхностях, которые необходимо использовать в качестве установочных баз на всех стадиях обработки. Эти поверхности должны быть обработаны наиболее тщательно как с точки зрения правильности их

форм, так и с точки зрения правильности и точности их взаимного положения в пространстве.

В производстве часто приходится иметь дело с явлением смены баз, т. е. устанавливать детали при обработке на разные базовые поверхности.

Смена баз бывает необходима в случаях:

1) когда нельзя обработать все поверхности детали (заготовки) с одной установки;

2) когда для получения требуемой точности или других показателей качества деталь приходится обрабатывать на разных станках;

3) когда для обработки детали приходится применять различные виды обработки и, следовательно, вести обработку на различных по своему назначению металлорежущих станках (токарном, фрезерном, зуборезном и т. п.).

Осуществляя смену баз технолог должен заранее рассчитать и установить определенные допуски на неточность обработки поверхностей, намеченных в качестве базовых, с целью сохранения необходимой связи между поверхностями прежней и вновь намечаемой технологической базы и исключения возможности выхода отклонений размеров обрабатываемой детали при смене баз за пределы установленных допусков.

Каждая смена баз всегда сопровождается появлением добавочных погрешностей на поверхностях детали и связывающих их размерах. Поэтому надо стремиться к тому, чтобы по возможности все поверхности детали можно было обработать и измерить от одних и тех же технологических баз, или, другими, словами, использовать принцип единства баз.

Практически принцип единства баз используется в полной мере лишь при обработке деталей в центрах на токарных станках и в патронах, выполняемой с одной установки. Если нельзя полностью применить принцип единства баз при обработке той или иной конкретной детали, то надо так построить процесс, чтобы данный принцип был использован в максимально возможной степени. Особенно это относится к той обработке, где требуется наиболее высокая точность взаимного расположения поверхностей данной детали, т. е. надо обеспечить обработку хотя бы этих поверхностей с одной установки.

Из механики известно, что каждое свободное абсолютно твердое тело имеет шесть степеней свободы (три поступательных и три вращательных) и положение его вполне определяется шестью независимыми величинами, например шестью координатами относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей. В соответствии с этим для определения правильного положения детали в приспособлении при его проектировании необходимо придерживаться принципа шести точек. Подробно с этим принципом и с его использованием при проектировании приспособлений можно ознакомиться в специальной литературе.

Силовое замыкание необходимо для того, чтобы деталь заняла и сохранила неизменным требуемое положение в процессе обработки. Для этого к детали прикладываются силы с целью ее закрепления. Естественно, что силы и их моменты, создающие силовое замыкание и обеспечивающие непрерывность контакта обрабатываемых деталей и элементов крепления, должны быть больше сил и их моментов, стремящихся нарушить этот контакт в процессе обработки.

При приложении сил, обеспечивающих силовое замыкание, могут возникать деформации закрепляемой детали. Эти деформации могут быть: контактными — за счет смятия микронеровностей опорных поверхностей; изгиба — за счет изгибания детали силами прижима при расположении этих сил вне опорных точек или между ними.

Для исключения указанного явления необходимы:

а) надлежащий выбор и подготовка базирующих поверхностей;

б) создание правильного силового замыкания с расположением точек приложения сил по возможности против опорных точек;

в) уменьшение контактных деформаций.

Глава VI. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА

1. Нормирование и методы повышения производительности труда

Под производительностью труда понимается эффективность затрат труда, уровень трудовых затрат на единицу продукции. Неуклонное повышение производительности труда является важнейшим условием роста и совершенствования социалистического производства, экономическим законом его развития.

Непрерывный технический прогресс, техническое совершенствование производства являются материальной основой и главным источником быстрого роста производительности труда на социалистических предприятиях. Технический прогресс находит свое выражение в создании новых более экономичных и эффективных машин, которые могут изготовляться с меньшими затратами труда и материальных ресурсов. Ведущая роль в этом деле принадлежит конструкторам и технологам предприятия.

В машиностроении измерение производительности труда ведется в единицах нормированного времени. Прогрессивные технически обоснованные нормы служат большой мобилизующей силой в борьбе за неуклонный рост производительности труда. Вопросы нормирования труда подробно изучаются в курсе «Экономика промышленности». В данном разделе мы остановимся

только на основных положениях технического нормирования, позволяющих более ясно изложить некоторые технологические основы повышения производительности труда.

Время t, затрачиваемое на операцию, слагается из двух частей:

а) подготовительно-заключительного времени ($T_{п\text{-}з}$), затрачиваемого на приемы, производимые рабочим один раз на всю партию изготовляемых деталей, т. е. времени на ознакомление с чертежом и технологическим процессом, на наладку станка для обработки партии деталей, на получение и сдачу работы, приспособлений, инструментов, чертежей и технологической документации, а также времени на приведение в порядок рабочего места после окончания работы;

б) штучного времени ($t_{шт}$), т. е. основного времени, затрачиваемого на выполнение данной операции для одной детали.

Изложенное может быть записано в виде следующих формул:

$$t = \frac{T_{п\text{-}з}}{n} + t_{шт},$$

или

$$T_{парт} = T_{п\text{-}з} + t_{шт} n,$$

где n — количество деталей в партии;

$T_{парт} = tn$ — нормированное время на выполнение одной операции при партии деталей в количестве n штук.

Сокращение подготовительно-заключительного времени может быть достигнуто на основе лучшей организации труда, своевременной и хорошей подготовки производства, правильного обслуживания рабочего места, предварительного комплектования чертежей, инструментов и приспособлений, необходимых для выполнения операции и подноски их к станку, применения прогрессивных быстро налаживаемых приспособлений и других мероприятий по совершенствованию организации производства.

Штучное время выражается формулой

$$t_{шт} = t_{от} + t_{в} + t_{об} + t_{д},$$

где $t_{от}$ — основное технологическое время;

$t_{в}$ — вспомогательное время;

$t_{об}$ — время обслуживания рабочего места;

$t_{д}$ — время перерывов на отдых и естественные надобности рабочего.

При станочной обработке основное технологическое время определяется расчетом, для каждого технологического перехода в отдельности, по формуле вида

$$t_{от} = \frac{Li}{s_{м}},$$

где L — расчетная длина обработки (в мм), получаемая путем прибавления к длине обрабатываемой поверхности размеров пути на врезание и перебег режущего инструмента;

i — число проходов в данном переходе;

$s_м$ — минутная подача инструмента в мм.

При проведении расчета используются операционно-нормировочные карты по разработанному технологическому процессу. Вспомогательное время затрачивается на элементарные действия (приемы), являющиеся вспомогательными при выполнении обработки деталей. Сумму основного и вспомогательного времени называют оперативным временем. При станочной обработке основное технологическое время может быть уменьшено за счет повышения режимов резания ($s_м$), уменьшения расчетной длины (L) и уменьшения числа проходов (i).

Из числа технологических мероприятий, направленных на повышение режимов резания, можно назвать внедрение нового высокопроизводительного оборудования, модернизацию действующего оборудования, совершенствование конструкции и геометрии режущего инструмента, изыскание и внедрение в производство новых высокостойких инструментальных материалов и твердых сплавов.

Сокращение вспомогательного времени может быть достигнуто за счет механизации и автоматизации работ. Внутри станочных операций, которые считаются в принципе механизированными, большинство вспомогательных приемов являются не механизированными, так как выполняются вручную. К ним относится установка и закрепление деталей, управление механизмами станка, контроль размеров в процессе обработки. Процесс резания, т. е. основная полезная работа станка, затрачиваемая на резание металла, особенно на крупном оборудовании при обработке корпусных деталей турбин, составляет меньше половины штучного времени. Поэтому механизация вспомогательных приемов является крупным резервом повышения производительности труда и лучшего использования оборудования.

При определении направления рационализации технологических и производственных процессов не может быть общего подхода. В каждом отдельном случае должны приниматься решения, основанные на глубоком критическом анализе конкретных условий. В одном случае это может быть повышение режимов обработки, т. е. сокращение машинного времени, а в другом — вспомогательного.

Рассмотрим, например, обработку турбинных лопаток первой и последней ступени. Лопатка первой ступени имеет длину 40 мм, а последней ступени 1030 мм. В первом случае машинное время при обработке наружного профиля профильной фрезой составляет около 2 мин, а во втором — 55 мин при установочном времени соответственно 2 и 6 мин. Если с применением механи-

зации установочное время можно сократить в 3 раза, то в первом случае это даст сокращение штучного времени на 33%, а во втором — только на 5%. В силу этого в первом случае (учитывая меньшую сложность модернизации приспособления, чем во втором случае) механизация зажима детали в приспособлении может оказаться целесообразной, тогда как во втором случае затраты на ее осуществление могут не оправдаться.

Основными мероприятиями, направленными на повышение производительности труда, являются совершенствование конструкции выпускаемой продукции с разработкой новых наиболее экономичных и эффективных машин, которые могут изготовляться с меньшими затратами труда и материальных ресурсов; совершенствование технологичности изделий; внедрение прогрессивной технологии; совершенствование парка основного оборудования предприятий на основе применения более высокопроизводительных станков и модернизации существующих; оснащение технологических процессов высокопроизводительными инструментами и приспособлениями, механизирующими и автоматизирующими труд; максимальная типизация технологических процессов и унификация деталей, что позволяет совершенствовать формы и виды применяемых производственных процессов.

2. Себестоимость машины и резервы ее снижения

Каждая вновь изготовляемая машина должна не только отвечать всем требованиям ее служебного назначения, но и отличаться от ранее выпущенных меньшими затратами материалов и обоих видов труда (живого и овеществленного). Полные затраты труда и материалов на изготовление машины, выраженные в денежной форме, определяют себестоимость данной машины. Непрерывное снижение себестоимости выпускаемых машин является одной из основных задач технологии машиностроения. Различают себестоимость машины в целом, себестоимость ее отдельных сборочных единиц, деталей и отдельных операций технологического процесса их изготовления.

Снижение себестоимости достигается путем проведения большого количества различных организационно-технических мероприятий. В начале данного раздела на отдельных примерах были показаны технологические основы повышения производительности труда, которые одновременно являются и путями снижения себестоимости продукции.

На рис. 3 показана структура себестоимости турбины [9] по усредненным показателям ряда турбинных заводов. Как можно определить по этому рисунку, основными резервами снижения себестоимости являются:

а) снижение расходов на материалы, что может быть достигнуто путем применения более рациональных заготовок, влияю-

щих на уменьшение расхода металла, применения более дешевых марок материалов и более дешевых заготовок;

б) снижение трудозатрат за счет совершенствования технологических процессов;

в) снижение накладных расходов путем лучшего использования оборудования, приспособлений и инструментов, экономии электроэнергии, воды, воздуха, топлива и других вспомогательных материалов, стоимость которых учитывается в статье накладных расходов.

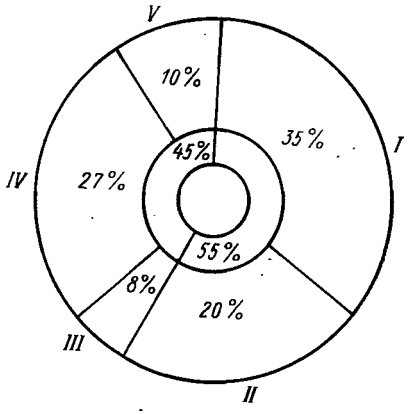


Рис. 3. Примерная структура себестоимости турбин:

I — стоимость покупных полуфабрикатов и изделий; *II* — стоимость полуфабрикатов своего производства и материалов; *III* — общезаводские и *IV* — цеховые расходы; *V* — заработная плата работников предприятия

3. Технологичность конструкции

Конструирование — это творческий процесс создания машины, конкретно выраженный в разработке конструкторской документации, главным образом чертежей. Конструирование — процесс многовариантный.

Конструктор всегда должен выбрать наилучший — оптимальный вариант.

Конструкции деталей, сборочных единиц и машины в целом определяются, в первую очередь, их служебным назначением, однако конструктор должен всегда ясно представлять процесс изготовления машины и каждой ее детали. При конструировании детали нужно взвесить, не будет ли она сложна и трудоемка в изготовлении и нельзя ли ее упростить, с тем чтобы ее можно было легче и без больших затрат изготовить в имеющихся производственных условиях; не завышены ли точность и чистота обработки детали; надо учесть также ожидаемый расход и стоимость металла; просмотреть возможность унификации детали, т. е. возможность использования уже изготовленных деталей других машин.

Конструктор при проектировании изделий должен также учесть, какое количество их подлежит изготовлению. От этого в значительной степени зависит технология изготовления новой машины. Машина, сборочная единица и деталь, спроектированные без рассмотрения технологии их изготовления, могут оказаться или вовсе непригодными для производства, или потребуют слишком больших затрат: Деталь, спроектированная для единичного изготовления, может оказаться абсолютно нетехнологичной в массовом производстве, и наоборот.

Это можно показать на следующем простом примере.

Шестигранная головка болта может быть получена фрезерованием (при изготовлении болта из круглой горячекатаной или светлокатаной заготовки), прокаткой (при использовании шестигранного проката), высадкой на прессе (при светлокатаной заготовке, равной диаметру резьбы). Для каждого из указанных способов формообразования головки должен быть соответственно оформлен чертеж болта (определены размеры галтелей, форма головки, точность и чистота обработки). Однако фрезерование из круглой заготовки (прутка) целесообразно при единичном изготовлении, использование шестигранного проката — при крупных сериях, высадка на прессе — при массовом производстве. Зная масштаб производства, конструктор правильно оформит чертеж и сделает конструкцию технологичной.

Конструкция машины или детали будет технологичной, если она позволяет в полной мере использовать все возможности и особенности наиболее экономичных технологических процессов, обеспечивающих при определенном количественном выпуске минимальную трудоемкость изготовления и высокое качество изделия с точки зрения его служебного назначения. Подробнее вопросы технологичности конструкции типовых турбинных деталей рассматриваются при изучении методов их обработки.

Технологичность конструкции той или иной детали, сборочной единицы, машины в целом никогда нельзя считать окончательно отработанной, т. е. застывшей на определенном уровне. Она должна непрерывно совершенствоваться параллельно с совершенствованием условий самого производства [18].

Технологичность конструкции машин может обеспечиваться как в процессе разработки конструкции новой машины, так и путем внесения необходимых измерений в конструкцию после выпуска чертежей, уже в процессе производства по предложениям технологов и рабочих. Выше уже было отмечено, что первый путь является наиболее эффективным. При этом не только разрабатывается более эффективная конструкция, но и создаются предпосылки лучшей организации производства, а вместе с тем существенно сокращается цикл подготовки производства новой машины.

Наилучшие результаты обеспечиваются при живой связи и творческом содружестве конструкторов с технологами и квалифицированными рабочими с самого начала конструирования новой машины.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ РОТОРОВ ТУРБИН

Глава VII. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РОТОРАХ ТУРБИН

Ротором называется вращающаяся часть турбины, несущая на себе рабочий лопаточный аппарат, с помощью которого осуществляется преобразование кинетической и потенциальной энергии рабочей среды (пара, газа) в механическую работу путем вращения турбиной подсоединенного к ней ротора генератора или любой другой рабочей машины.

Ротор является наиболее ответственной частью турбины. В условиях эксплуатации турбины ротор подвергается действию центробежных сил, крутящего и изгибающего моментов, растягивающих осевых сил и нагрузки от собственного веса. Лопатки и диски ротора при действии на них возмущающих сил как от рабочей среды (пара, газа), а также и по другим причинам, работают в условиях вибрации со знакопеременными напряжениями. По своей конструкции роторы разделяются на дисковые, цельнокованые, барабанные и комбинированные.

Дисковый ротор [рис. 4 (передний план) и рис. 120] представляет собой вал с насаженными на него облопаченными дисками. Применяют такие роторы в области умеренных температур и давлений пара.

У цельнокованых роторов вал откован заодно с дисками (рис. 5). Они применяются для мощных турбин высокого давления. При температурах пара 500° С и выше отсутствие посадок дисков является основным преимуществом таких роторов.

Барабанным ротором называется барабан (рис. 6, *а*), откованный заодно с валом, в пазы которого вставляются рабочие лопатки. Такие роторы делают составными, что обеспечивает возможность их облегчения путем растачивания бочкообразной плоскости в барабане. Отдельные части ротора соединяются горячей посадкой и скрепляются между собой при помощи болтов (рис. 7).

В газовых турбинах применяются преимущественно роторы барабанного типа. Барабанная часть ротора может иметь еще и насадные диски. В таком случае роторы называются комбинированными.

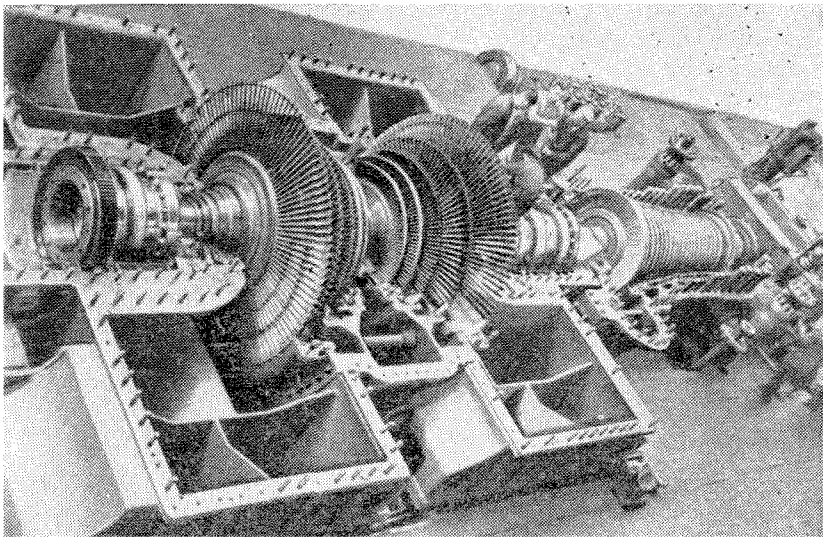


Рис. 4. Роторы турбины. На переднем плане дисковый ротор

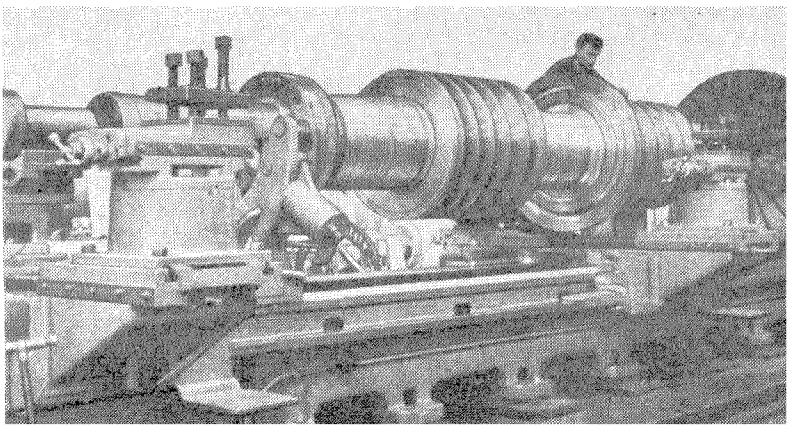


Рис. 5. Цельнокованый ротор в процессе чистовой обработки

На рис. 6, *в* представлен сварной ротор турбины типа ПВК150 низкого давления. По сравнению со сборными роторами дискового или барабанного типа, сварной ротор обладает

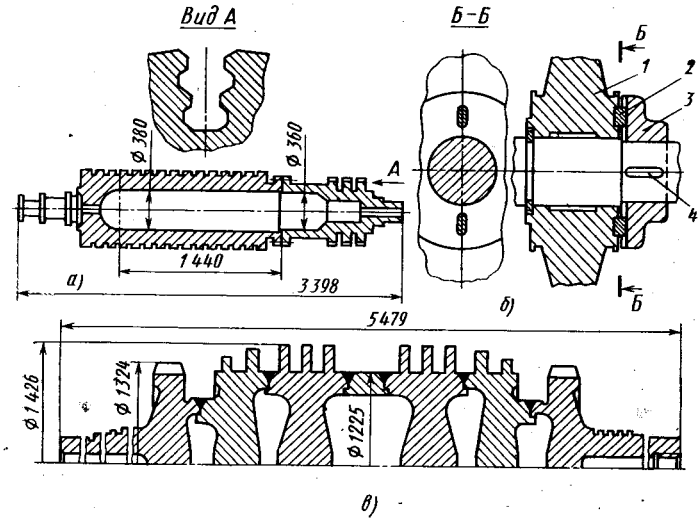


Рис. 6. Конструкции соединений частей роторов:
а — болтами; *б* — торцовыми радиальными шпонками; *в* — сваркой

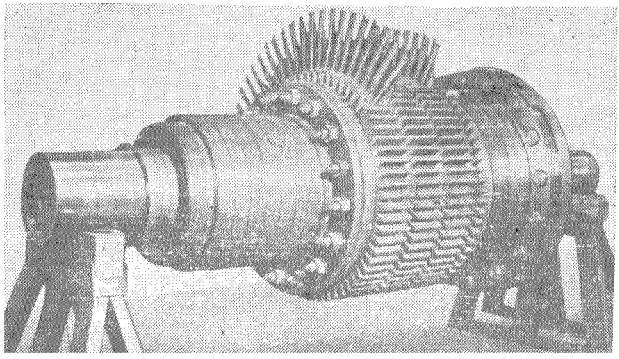


Рис. 7. Ротор мощной газовой турбины

рядом значительных технологических преимуществ: упрощаются поковки, сокращается цикл механической обработки. Изготовление сварных роторов требует весьма высокого уровня сварочной техники. С точки зрения технологичности роторы турбин достаточно хорошо отработаны.

Основными деталями ротора являются валы, диски и рабочие лопатки. Диски с насаженными на них лопатками называют

также и рабочими колесами. Посадка дисков на вал осуществляется с натягом, обеспечивающим постоянную плотность соединения без возможности ослабления как в рабочих условиях от действия центробежных сил массы диска, так и при пусках турбины, из-за различия температур диска и вала в процессе прогревания. Необходимая величина натяга определяется расчетом.

Ориентировочная величина натяга составляет 0,001 диаметра вала. Разность между максимальным и минимальным натягами обычно равна 0,05—0,08 мм, что обеспечивается обработкой посадочных мест диска и вала в пределах 1-го класса точности. Посадка дисков с натягом не исключает необходимости применения осевых шпонок (одной или двух на каждый диск), которые обеспечивают передачу крутящего момента от диска к валу.

Чтобы не ослаблять осевыми шпоночными канавками ступицу *1* (см. рис. 6, *б*) особо напряженных дисков, вместо обычного осевого шпоночного соединения применяют радиальные шпонки *2*, устанавливаемые в пазах на торце ступицы. В этой конструкции крутящий момент будет передаваться через две радиальные шпонки на специальную малонагруженную втулку *3*, связанную с валом осевой шпонкой *4*.

В конструкциях роторов судовых турбин применяют так называемые пальцевые втулки. Втулка своим наружным диаметром точно, но без натяга, пригоняется к диску и соединяется с ним при помощи ряда радиальных штифтов. Диск с втулкой насаживается на вал с обычным натягом и удерживается от проворачивания осевыми шпонками, установленными в пазы, выполненные в валу и пальцевой втулке. Если под действием температуры или центробежных сил диаметр отверстия в диске станет больше диаметра пальцевой втулки, то соосность диска и втулки (а следовательно, и вала) все же сохранится вследствие наличия радиальных штифтов. В то же время посадка втулки на валу не может ослабеть, так как напряжения во втулке под действием ее центробежной силы незначительны, а температура втулки почти не отличается от температуры вала. Данная конструкция особенно уместна в сильно нагруженных дисках, а также в первых ступенях высокого давления судовых турбин, где время прогрева турбины обычно очень мало.

Детали собранного ротора должны быть надежно закреплены против воздействия усилий проходящего пара, стремящегося сдвинуть их вдоль вала. Вместе с этим детали ротора должны иметь возможность свободного теплового расширения, что обеспечивается наличием гарантированных тепловых зазоров.

Ввиду того что роторы турбин работают в весьма напряженных и тяжелых условиях, к выбору материалов для деталей роторов, к качеству их обработки и качеству сборки роторов предъявляются высокие требования, о которых подробно сообщается в соответствующих главах книги.

Глава VIII. РАБОЧИЕ И НАПРАВЛЯЮЩИЕ ЛОПАТКИ

1. Назначение лопаток и условия их работы

Направляющие и рабочие лопатки по своему служебному назначению являются основными деталями паровых и газовых турбин как лопаточных двигателей. В совокупности они образуют проточную часть турбины, в которой происходит преобразование тепловой энергии рабочей среды (пара, газа) в механическую работу вращающегося ротора. Совокупность направляющих и рабочих лопаток называют лопаточным аппаратом турбины.

Лопаточный аппарат является самой дорогой и наиболее ответственной частью турбины. Экономичность турбины — ее к. п. д.— в первую очередь зависит от качества выполнения лопаточного аппарата. Трудоемкость изготовления лопаток современной мощной паровой турбины достигает 42—45% от общей трудоемкости изготовления всех ее деталей.

Лопатки турбин работают в очень тяжелых условиях. Они подвергаются сильному воздействию центробежной силы, изгибающему и пульсирующему воздействию рабочей среды, вызывающему вибрации лопаток, в которых легко могут быть возбуждены резонансные колебания. Все это происходит в первых ступенях турбины при высоких температурах рабочей среды, воздействующей на лопатки как химически, так и механически; в последних ступенях имеет место разъедание (эрозия) входных кромок лопаток частицами воды, содержащейся во влажном паре.

Указанные условия требуют особо тщательного подхода к вопросам конструирования лопаток, выбора материалов для них и организации их производства. Особо тщательно следует выполнять все образующие формы лопаток размеры и соблюдать установленные для их изготовления технические требования. Отклонения от чертежей могут вызвать в лопатках дополнительные напряжения, не предусмотренные расчетами, что, в свою очередь, может привести к серьезной аварии турбин.

2. Материалы, применяемые для изготовления лопаток

Анализ условий, в которых работают лопатки, и изучение типичных аварий лопаточных аппаратов обусловили следующие требования к материалу рабочих лопаток турбин:

а) высокая жаропрочность, т. е. сохранение высоких показателей прочности при высокой рабочей температуре;

б) высокая пластичность, необходимая для равномерного распределения напряжений по всей площади поперечного сечения лопатки; хорошая сопротивляемость местным перенапряжениям;

в) высокая усталостная прочность (выносливость);

г) высокий декремент затухания;

д) стабильность структуры, обеспечивающая неизменность механических свойств во время эксплуатации турбин;

е) сопротивляемость коррозии под действием перегретого и влажного пара, а также кислорода воздуха; высокая сопротивляемость окислению и окалинообразованию при высоких температурах в газовых турбинах;

ж) высокая сопротивляемость эрозии;

з) благоприятные технологические свойства, позволяющие применять более рациональные методы обработки лопаток (в первую очередь — обработку резанием) и обеспечивающих точное выполнение размеров профиля и высокую чистоту обработки. Металл для лопаток должен хорошо коваться, штамповаться, расклепываться без появления трещин, хорошо гнуться и вальцеваться в холодном состоянии. В случае сварных конструкций от металла лопаток требуется хорошая свариваемость.

Советские турбиностроительные заводы применяют для изготовления лопаток исключительно нержавеющие стали, в основном 1Х13 и 2Х13. Эти стали хорошо работают в области температур до 475° С. Заметное снижение прочности начинается лишь с 500° С. При температурах до 580° С применяется сталь 1Х12ВНМФ. Высокая пластичность этой стали обеспечивает незначительную чувствительность ее к концентрации напряжений. Перечисленные выше стали относятся к мартенситному и мартенситно-ферритному классу. Для более высоких температур применяются стали аустенитного класса с высоким содержанием марганца и никеля.

Проверенными в работе до температур свыше 580 до 650° С являются стали 1Х14Н18В2БР1 и ХН35ВТ. Сталь ХН35ВТ пригодна для длительной работы (до 100 000 ч) при температуре 650° С, а сталь ХН35ВТК (отличается от первой в основном содержанием кобальта) — при температуре до 700° С. Основным недостатком аустенитных сталей в лопаточном производстве является плохая обрабатываемость резанием и высокая стоимость заготовок. Поэтому при выборе сталей для лопаток надо стремиться прежде всего найти подходящий материал среди более дешевых хромистых сталей и только после этого начинать выбор среди аустенитных сталей (хромоникелевых).

Для лопаток, работающих при температурах свыше 650 до 800° С, используются более жаропрочные (чем стали) металлические сплавы на никелевой основе. Среди них ХН70ВМЮТ, ХН80ТБЮ и др.

Повышение мощности турбин повлекло за собой увеличение длины лопаток последних ступеней свыше 1000 мм и потребова-

ло изыскания, в связи с этим, более прочных металлов, чем нержавеющие стали, так как прочностные возможности последних полностью используются в лопатках длиной до 1000 мм. Более подходящим для длинных лопаток металлом оказался титан и, в частности, его сплавы с алюминием.

Коррозионная стойкость титановых сплавов очень велика и приближается к свойствам благородных металлов. Сопротивление эрозии у них выше, чем у нержавеющих сталей, но ниже, чем у стеллита, а поэтому защита лопаток от эрозионного разрушения все-таки необходима. Декремент затухания этих сплавов ниже, чем у нержавеющих сталей. Изготовление заготовок и механическая обработка их также сложнее, чем нержавеющих сталей. Как горячая, так и холодная обработка требуют применения специальных режимов.

Для ленточных бандажей лопаточных аппаратов в зависимости от значений температуры и напряжений применяются стали 1Х13, 2Х13 и др. Для скрепляющей и демпферной проволоки в паровых турбинах применяется сталь типа 1Х13.

Из созданной в настоящее время большой номенклатуры лопаточных материалов рассмотренные здесь материалы являются наиболее употребительными.

3. Типовые конструкции лопаток

В лопаточных аппаратах турбин имеются рабочие (подвижные) и направляющие (неподвижные) лопатки. Наиболее простые типы их показаны на рис. 8 (активные) и на рис. 9 (реактивные). Они имеют постоянный по высоте профиль и могут быть изготовлены как из получаемого холодной прокаткой светлокатаного профиля, так и фрезерованием из горячекатаных заготовок. Уширение для образования хвоста у реактивных рабочих лопаток (рис. 9, *а*) получают осаживанием готового профиля на специальном прессе в холодном состоянии и называют высадкой. Крепление таких лопаток показано на рис. 10, *а*. Крепление активных лопаток показано на рис. 10, *б*.

В лопатках различают профильную часть *1*, хвост *2* и головку с шипом *6*. При помощи хвоста лопатки крепятся к диску турбины *3*. Между лопатками вставляются промежуточные тела (вставки) *4*, определяющие величину шага лопаток и являющиеся нижней стенкой канала. По высоте каналы активных ступеней турбины ограничиваются ленточными бандажами *5*, которые надеваются на шипы и удерживаются расклепкой шипов. У реактивных лопаток (см. рис. 9) головные части выполняются с утонением.

Крупные лопатки (рис. 11 и 12) выполняются заодно с промежуточными телами и с профильными (рис. 11, *а*) или с плоскими (рис. 11, *б*) поверхностями сопряжения. На рис. 13 и 14

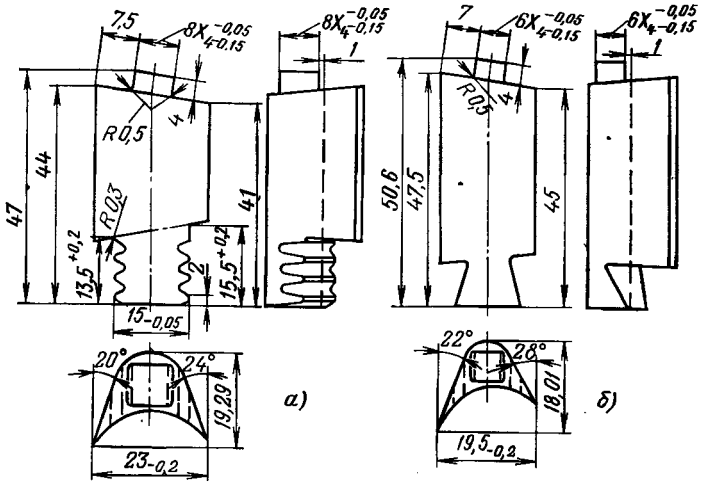


Рис. 8. Лопатки ступени скорости.
а — рабочая; *б* — направляющая

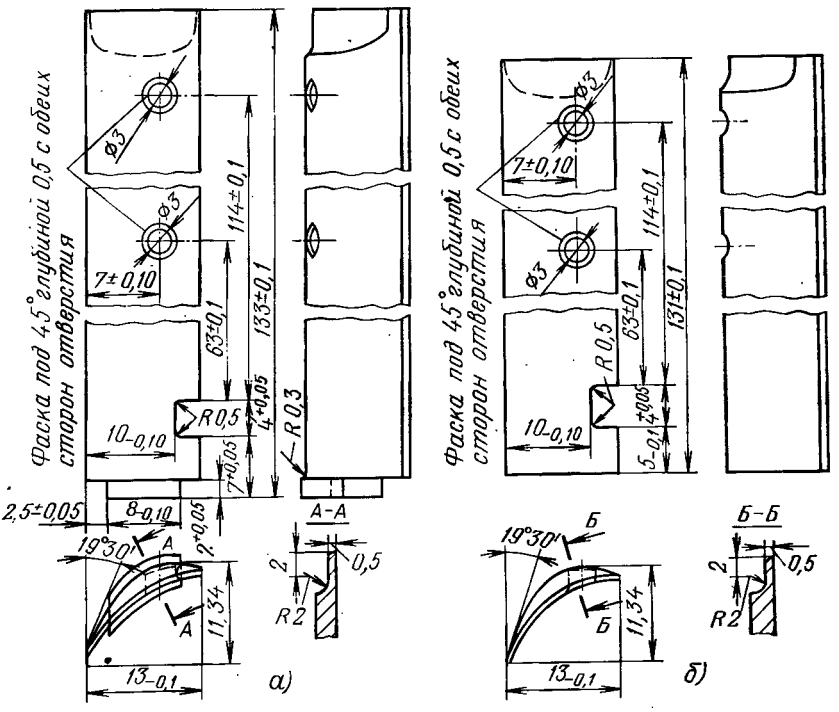


Рис. 9. Лопатки реактивной турбины:
а — рабочая; *б* — направляющая

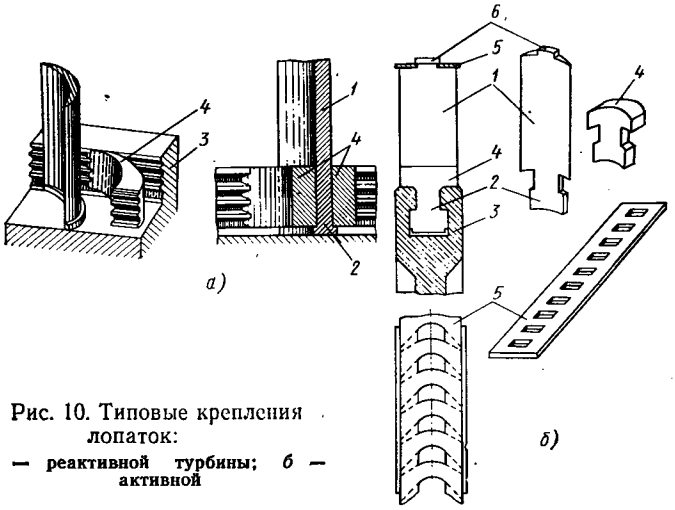


Рис. 10. Типовые крепления лопаток:

а — реактивной турбины; б — активной

Рис. 11. Рабочие лопатки последних ступеней турбины:

а — 30-я ступень турбины Сименс-Шуккерт (50 МВт, 1500 об/мин); *б* — 12-я ступень турбины ЛМЗ (50 МВт, 3000 об/мин); *в* — 31-я ступень турбины ББЦ (50 МВт 3000 об/мин)

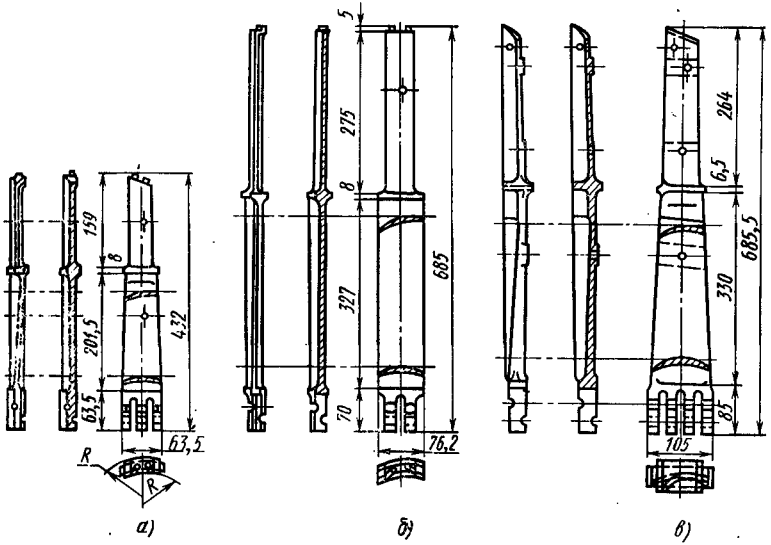


Рис. 12. Двухъярусные рабочие лопатки:

а — 24-й ступени трубины мощностью 24 Мвт, *б* — 39-й ступени турбины мощностью 50 МВт; *в* — 11-й ступени турбины мощностью 100 МВт

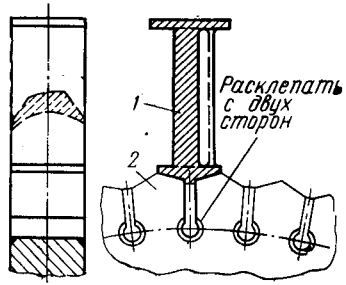


Рис. 13. Рабочая лопатка турбины Лаваля:

1 — лопатка; *2* — обод диска

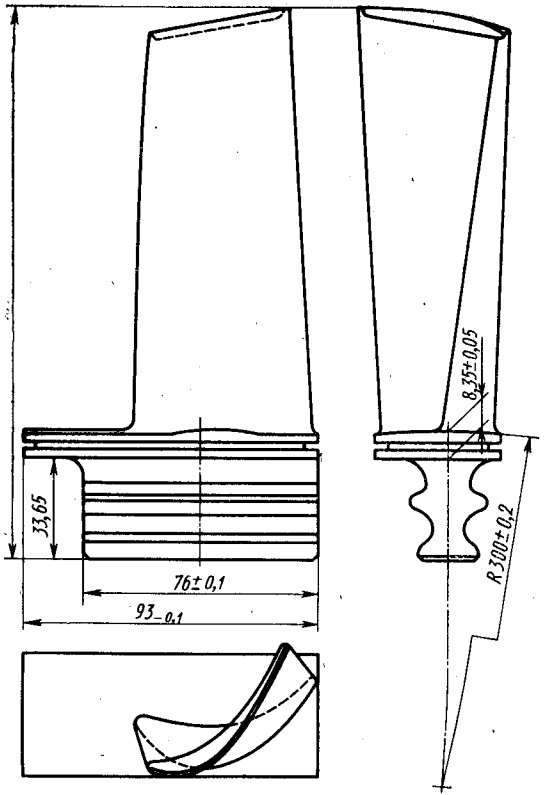


Рис. 14. Рабочая лопатка с торцовой заводкой в паз ротора

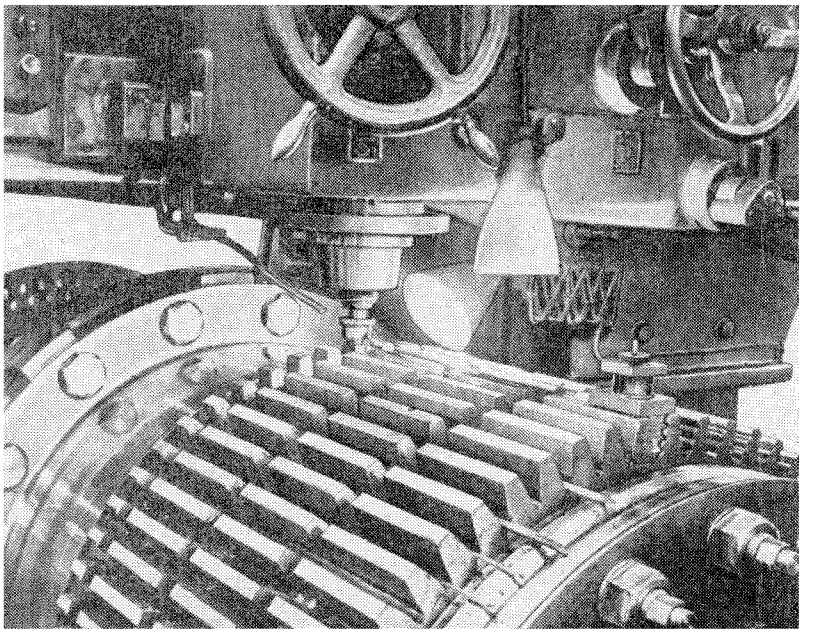


Рис. 15. Схема фрезерования пазов под лопатки в роторе газовой турбины

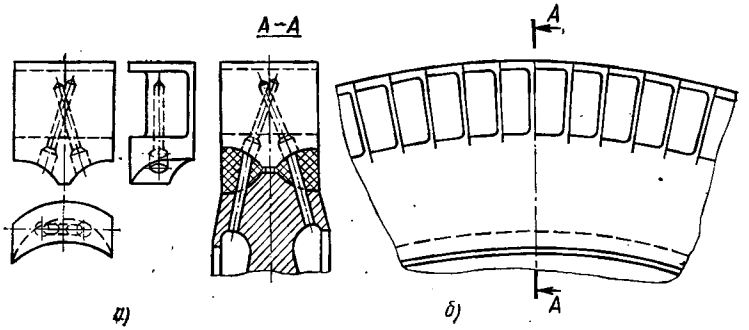


Рис. 16. Обод рабочего колеса с приваренными лопатками:
а — лопатка; *б* — обод после сварки и механической обработки

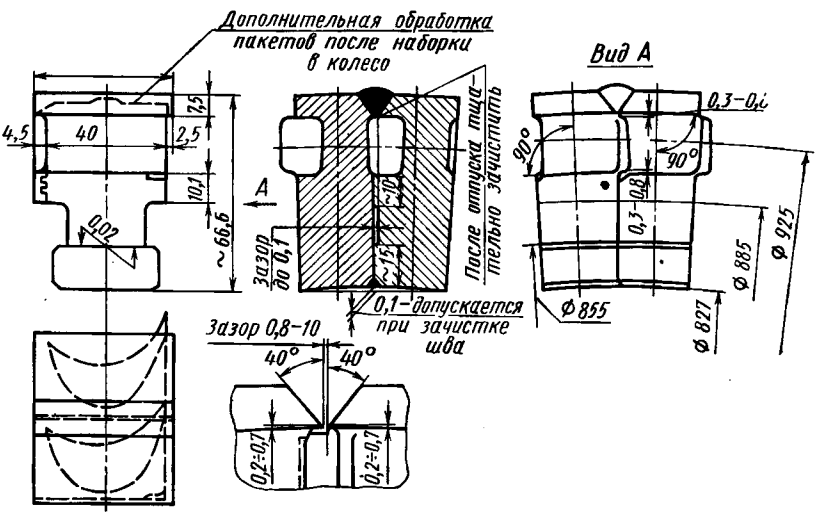


Рис. 17. Сварной пакет лопаток 1-го венца колеса турбины 50 МВт

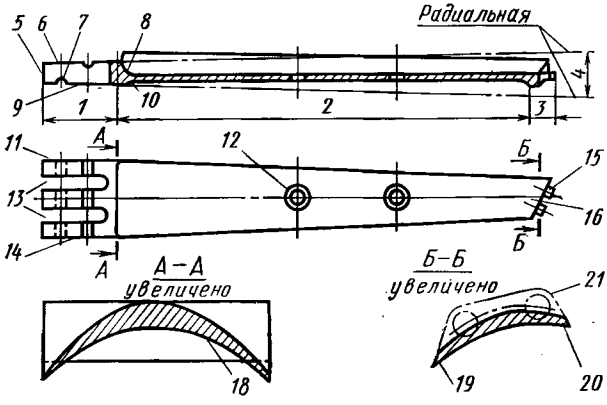


Рис. 18. Части лопатки:

1 — хвост; *2* — рабочая часть или перо лопатки; *3* — головная часть или головка; *4* — радиальный угол; *5* — торец хвоста; *6* — внутренняя радиальная плоскость хвоста; *7* — полуотверстия под заклепки; *8* — внутренняя галтель; *9* — наружная радиальная плоскость хвоста; *10* — наружная галтель; *11* — выходная боковая плоскость хвоста; *12* — отверстия для скрепляющей проволоки; *13* — пазы хвоста; *14* — входная боковая плоскость хвоста; *15* — шип; *16* — торец головной части; *18* — профили сечения лопатки (вогнутый — внутренний, выпуклый — наружный); *19* — выходная кромка; *20* — входная кромка; *21* — профиль головной части

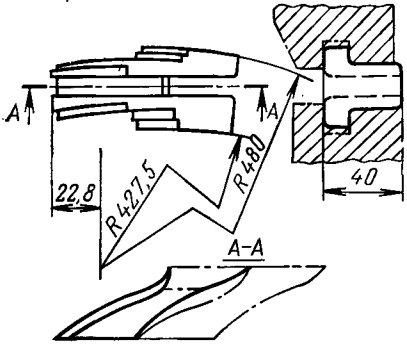


Рис. 19. Направляющая лопатка первой ступени высокого давления

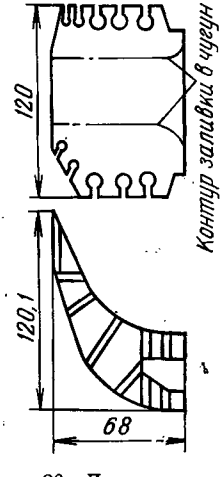


Рис. 20. Лопатка литой диафрагмы, изготовляемая фрезерованием

показаны лопатки с торцовой заводкой в пазы ротора, а на рис. 15 для примера показано фрезерование пазов в роторе под установку лопаток. На рис. 16, *а* показана рабочая лопатка, изготовленная под приварку, а на рис. 16, *б* — обод диска с приваренными лопатками после механической обработки.

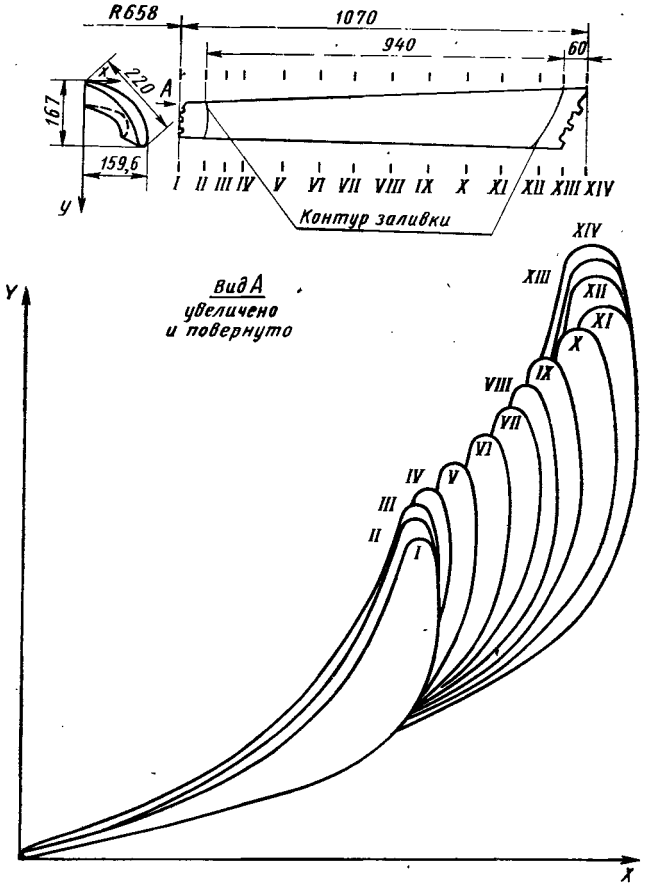


Рис. 21. Лопатка литой диафрагмы последней ступени турбины мощностью 50 МВт (Т-50-130):
I — XIV — номера сечений

Электросварка начинает прочно входить в практику лопаточного производства; она применяется для приварки лопаток к дискам, для приварки лопаток к диафрагмам, для сварки пакетов лопаток (рис. 17).

Каждая часть и отдельные поверхности лопаток имеют свои названия, выработанные практикой (рис. 18). Наиболее распро-

страненные типы направляющих лопаток показаны на рис. 19—22.

Направляющие лопатки могут набираться в пазы, проточенные в корпусах (см. рис. 9, *б*), направляющих аппаратах (см. рис. 8, *б*), в диафрагмах и сопловых коробках (рис. 19) или заливаться в тела чугунных диафрагм.

Лопатки, заливаемые в чугунные диафрагмы, имеют самые разнообразные формы. Они могут штамповаться из листовой

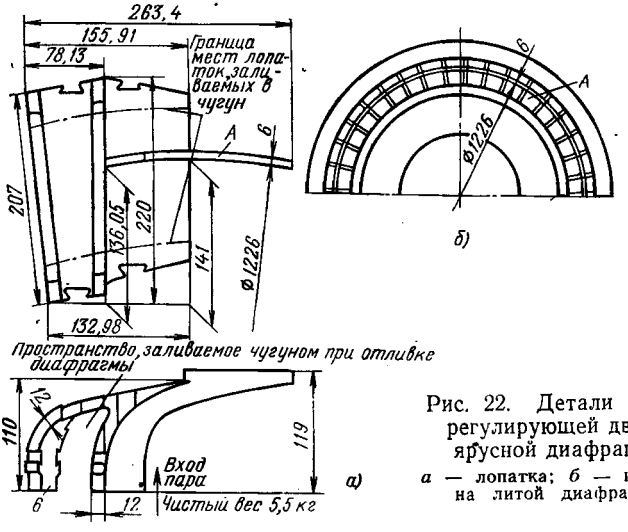


Рис. 22. Детали литой регулирующей двухъярусной диафрагмы:
а — лопатка; *б* — половина литой диафрагмы

стали, изготовляться из светлокатаных профильных полос, фрезероваться из отдельных заготовок (рис. 20 и 21) и отливаться методом точного литья по выплавляемым моделям (рис. 22), что особенно эффективно при весьма сложных формах лопаток. Мостики *А* более технологично выполнять приварными.

4. Основные требования к механической обработке лопаток

Хорошее качество лопаток, как и всех прочих деталей турбины, зависит от правильного выполнения установленных в чертежах конструктивных размеров и чистоты обработки поверхностей.

Каждые части лопатки (хвост, рабочая часть и головка) имеют различное назначение. Хвост служит для надежного и плотного закрепления лопатки на рабочем колесе (рабочая лопатка) или в корпусе турбины (направляющая лопатка). Рабочая часть предназначена для восприятия давления пара, а головка для крепления бандажа. Если у хвоста лопатки в соответствии с его служебным назначением большое значение имеет степень точности, с которой выполнены все посадочные размеры хвоста, то

для рабочей части, размеры которой не являются посадочными, большее значение имеет степень чистоты обработки. Хорошо отполированная поверхность рабочей части содействует уменьшению потерь пара на трение о поверхность лопатки, увеличивая в то же самое время антикоррозионную стойкость лопатки.

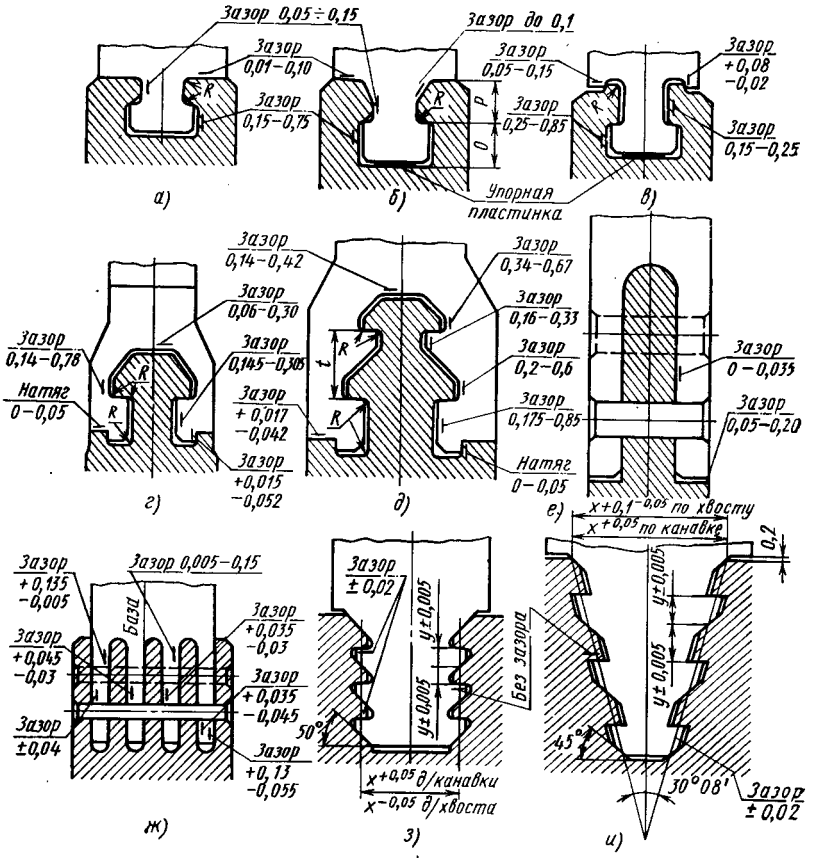


Рис. 23. Технические требования к сопряжениям типовых хвостовых соединений

Все размеры лопаток, по требованиям к их точности, можно разбить на три группы.

Первая: размеры, от которых зависит характер соединения лопаток с другими деталями турбины, т. е. посадочные размеры. К ним относятся в первую очередь размеры хвостов и шипов под насадку бандажных лент. Требования к сопряжениям хвостовых соединений показаны на рис. 23. Диаметр шипа (при круглом шипе) и ширина и толщина шипа (при прямоугольном шипе) выполняются по ходовым посадкам 4-го класса.

Вторая: размеры, не являющиеся посадочными, но требующие повышенной точности. К ним относятся координаты расположения паровых каналов относительно хвостов лопаток; размеры сечений рабочих частей; размеры, определяющие установку лопаток и расположение отверстий под скрепляющую проволоку и т. п. Выполняются эти размеры или по 3 и 4-му классам точности, или по свободным нестандартным допускам в пределах от ±0,1 мм до ±0,5 мм, в зависимости от размеров лопатки.

Третья: свободные размеры, к которым обычно относятся размеры галтелей, фасок и других менее ответственных элементов лопаток. Точность свободных размеров или совсем не нормируется или ограничивается допусками 7-го класса точности. Однако даже и в том случае, когда на свободные размеры не установлено никаких допусков, они выполняются обычно по допускам, установленным на свободные размеры специальными технологическими инструкциями, выпускаемыми на данном предприятии.

Чистота обработки посадочных поверхностей выдерживается в пределах 6-го класса, рабочих профилей и галтелей у рабочих частей — 8—9-го классов.

Наиболее ответственными являются посадочные размеры хвостовых соединений. На рис. 23 приведены допуски на величину зазоров в наиболее распространенных соединениях хвостов лопаток с венцами дисков. Эти допуски, а также и чистота обработки должны быть обеспечены соответствующей точностью станочной обработки и качеством режущего инструмента. Слесарная пригонка посадочного профиля хвоста допускается только для вильчатых соединений.

Т-образные хвосты типа *а* и *б* обрабатываются профильными фрезами, хвосты типа *в* — точением на карусельных станках. Чтобы выбрать радиальный зазор по размеру О (тип *б*) и этим избежать пригонки по размеру *Р* у этого типа соединений, а также и у хвостов типа *в*, под хвосты лопаток при облопачивании турбин подкладывают стальные пластинки. Хвосты типов *г* и *д* называют грибовидными. Их обрабатывают профильными пальцевыми фрезами.

Чистовые фрезы должны обеспечить очень высокую точность выполнения профиля, для того чтобы зазор по размеру *t* не превышал 0,03 мм.

Вильчатые хвосты типа *е* и *ж* бывают одно- и многопазовыми. Существенным недостатком многопазовых вильчатых профилей является система предельных отклонений, показанная для примера на рис. 24 применительно к профилю 5004 ТМЗ. При этой системе наряду с положительными величинами зазоров существенную долю могут составлять отрицательные зазоры — натяги, вызывающие необходимость слесарной пригонки. Особенно затруднительно в этом случае переоблопачивание дисков на электростанциях.

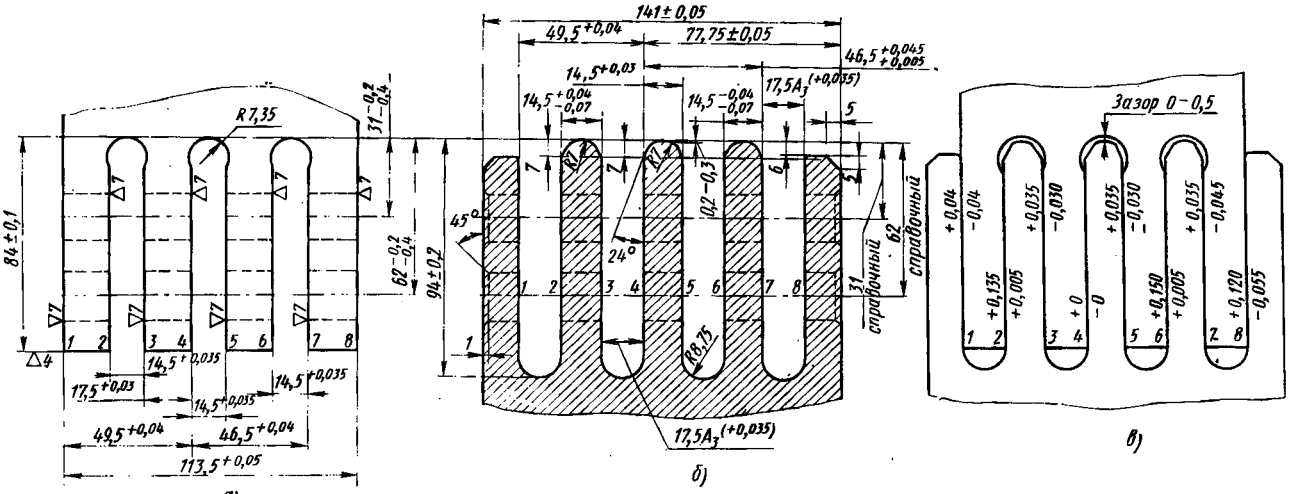


Рис. 24. Допуски на размеры трехпазового вильчатого хвоста 5004 ТМЗ:

а — лопатки; *б* — диска; *в* — сопряжения (зазор 0—0,5 только по вершинам среднего гребня; по вершинам крайних гребней — посадка с натягом)

Опыт ТМЗ показывает возможность создания такой системы предельных отклонений, при которой полностью исключается появление натягов и при этом обеспечивается (что очень важно) удовлетворительное сопряжение новых профилей хвостов лопаток с венцами дисков действующих турбин. Вариант такой системы применительно к профилю 5004 ТМЗ показан на рис. 25.

Хвосты типа *з* — с зубчатым профилем и *и* — «елочные» (см. рис. 23) требуют особо точного выполнения. Это достигается фрезерованием прецизионными профильными фрезами на двухшпиндельных станках высокой точности и, в случае необходимости, шлифованием. Допуск 0,005 мм как для хвоста лопатки, так и для канавки в диске предусматривает посадку с нулевым зазором не только по горизонтальным, но и по наклонным поверхностям.

Хвосты типа *и* хорошо зарекомендовали себя в газотурбиностроении, но там канавки в венцах дисков прорезаются параллельно оси ротора (торцовая заводка лопаток), вследствие чего хвост лопатки заводится в канавку свободно, прилегая только по опорным горизонтальным площадкам, давая возможность лопатке в холодном состоянии качаться в пазу диска. В рабочем состоянии, вследствие различия температуры и коэффициентов линейного расширения металлов лопатки и диска, сопряжение лопатки с диском становится плотным.

Во всех конструкциях хвостов следует избегать острых углов. Особо ответственные места отмечены на рисунке буквой *R*. Радиусы скругления должны быть не менее 0,5 мм; чистота обработки посадочных поверхностей — не ниже 6-го класса.

Допуски на другие части лопаток даны при описании технологических операций их обработки.

5. Технологичность конструкций лопаток

Как указывалось ранее, лопаточный аппарат является самой ответственной и наиболее дорогой частью турбины. Совершенствование конструкции и технологии изготовления лопаток, изыскание новых более совершенных методов их обработки, отработка норм точности изготовления частей лопаток, а также и классов чистоты их поверхностей являются весьма актуальными задачами как с точки зрения повышения надежности и экономичности турбин, так и с точки зрения снижения их себестоимости.

За более чем полувековой период своего развития советское турбиностроение накопило значительные знания и опыт, достигло весьма высокого уровня технического прогресса в области проектирования и производства турбин. Одновременно совершенствовалась технологичность всех узлов и деталей, в том числе и лопаточного аппарата.

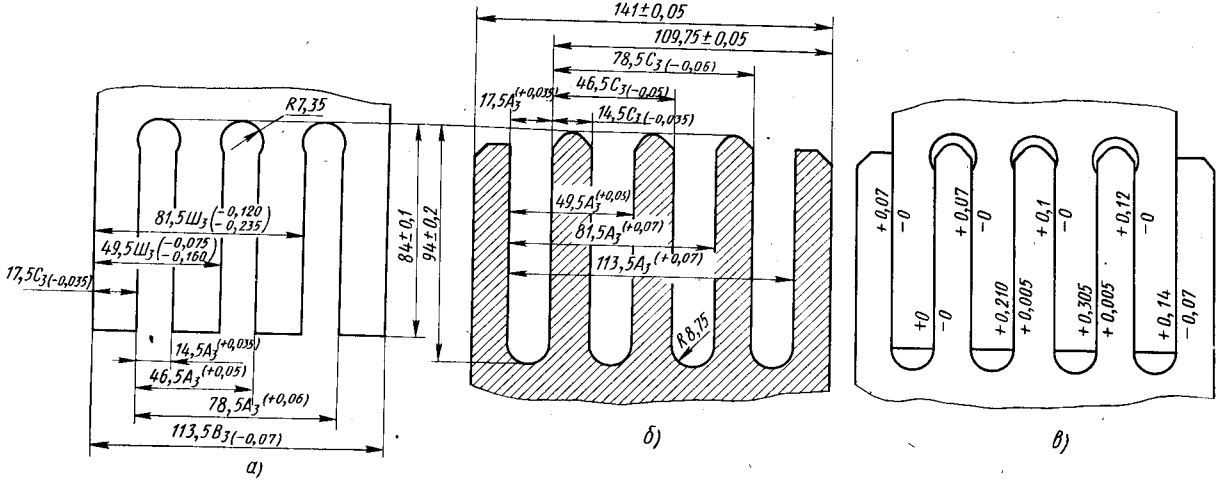


Рис. 25. Технологичная конструкция хвоста лопатки

В основном широко применяемые детали лопаточного аппарата следует признать достаточно технологичными, однако это не означает того, что возникающие при проектировании и изготовлении вопросы можно считать уже окончательно решенными. Технологичность конструкции лопаток должна постоянно совершенствоваться и это требует постоянной работы по изысканию новых, более прогрессивных решений.

В практике имеют место случаи, когда изменение условий производства, например в результате приобретения нового оборудования или улучшения технологического процесса, может приводить к тому, что деталь, ранее удовлетворявшая требованиям производства, становится нетехнологичной. Убедительным примером в данном случае могут служить многопазовые вильчатые профили, один из которых — трехпазовый показан на рис. 24. Система координации поверхностей пазов профиля и предельные отклонения размеров его, рассчитанные на слесарную пригонку при сборке, стали нетехнологичными при введении обработки поверхности пазов на шлифовальном станке с полуавтоматическим циклом. Последнее вызвало необходимость существенного изменения системы координации размеров и норм точности.

Примером нетехнологичной конструкции может служить также профильная часть направляющей лопатки, показанной выше на рис. 21. Входные кромки сечений *I* и *II* профильной части резко отклонены в сторону спинки лопатки, а сечений *XII*, *XIII* и *XIV* — в сторону внутреннего профиля. Это значительно усложняет технологию обработки лопатки. Неоправданность такой конструкции станет еще более очевидной, если учесть, что соответствующие места лопаток заливаются в материал диафрагмы и на аэродинамику каналов диафрагмы влияния не оказывают.

При создании новых конструкций лопаток, особенно большой длины, нельзя устанавливать для них те же нормы точности, которые приняты для коротких лопаток. Это может приводить к появлению в производстве нетехнологичных конструкций. Поэтому исследование вопросов, касающихся норм точности, должно быть одной из важных задач совершенствования технологичности конструкции лопаток при проектировании новых турбин.

6. Классификация и типизация лопаток

Главной целью классификации и типизации лопаток является последующая типизация технологических процессов и на этой основе совершенствование технологичности конструкций и технологии производства лопаток.

Анализ чертежей и технологических процессов механической обработки лопаток позволяет установить следующие основные положения.

1. Несмотря на существующее разнообразие конструкций, рабочие и направляющие лопатки паровых и газовых турбин мо-

гут быть приведены к нескольким основным типам. Многие конструкции основных элементов лопаток (хвостов, рабочих частей, головок) также являются типовыми и встречаются в различных сочетаниях в различных конструкциях лопаток.

2. Каждому типу лопаток соответствует вполне определенный технологический процесс обработки (особенно в части операций подготовки основных технологических баз), отличный от технологических процессов обработки лопаток других типов.

3. Каждому типу конструктивных элементов лопаток (хвостам, рабочим частям, головкам) свойственны определенный состав и последовательность технологических операций, независимо от типа лопатки.

Указанные положения и были положены в основу при разработке схемы типизации (рис. 26), предложенной Н. Я. Бауманом. По этой схеме обозначением и одновременно характеристикой типа служит четырехзначный номер. Первая цифра этого номера определяет класс лопатки, характеризующей ее служебное назначение, принадлежность лопатки к машине определенного вида и сочетание хвостовой и рабочей частей лопатки. Критерий класса назван «характеристикой по общему виду». По этой характеристике могут быть определены вид заготовки и состав первых операций для обработки базовых поверхностей. Примеры лопаток соответственно данной характеристике приведены в табл. 3. Не вошедшие в таблицу виды лопаток обозначаются в номере цифрой 0.

Вторая, третья и четвертая цифры номера соответственно определяют наиболее распространенные разновидности хвостов, рабочих частей и головок лопаток, скомплектованные по их технологической однородности в смысле одинакового состава и последовательности технологических операций обработки их. Эти характеристики являются, таким образом, критериями типизации как самих лопаток, так и технологических процессов.

Разновидность хвостов и головок, показанных на рис. 26, ясна без дополнительных пояснений. Отличительные признаки характеристики по рабочей части (третья цифра номера типа) приведены в табл. 4.

Предложенная схема типизации, не претендуя на широкую универсальность в качестве рабочей схемы, может служить основой для дальнейших разработок. В данной книге она является весьма полезным учебным пособием для более глубокого изучения технологии обработки турбинных лопаток.

7. Типовые технологические процессы обработки лопаток различных конструкций

В табл. 5—12 приведены схемы технологических процессов механической обработки наиболее распространенных типов рабочих и направляющих лопаток. Номера типов, указанные в таб-

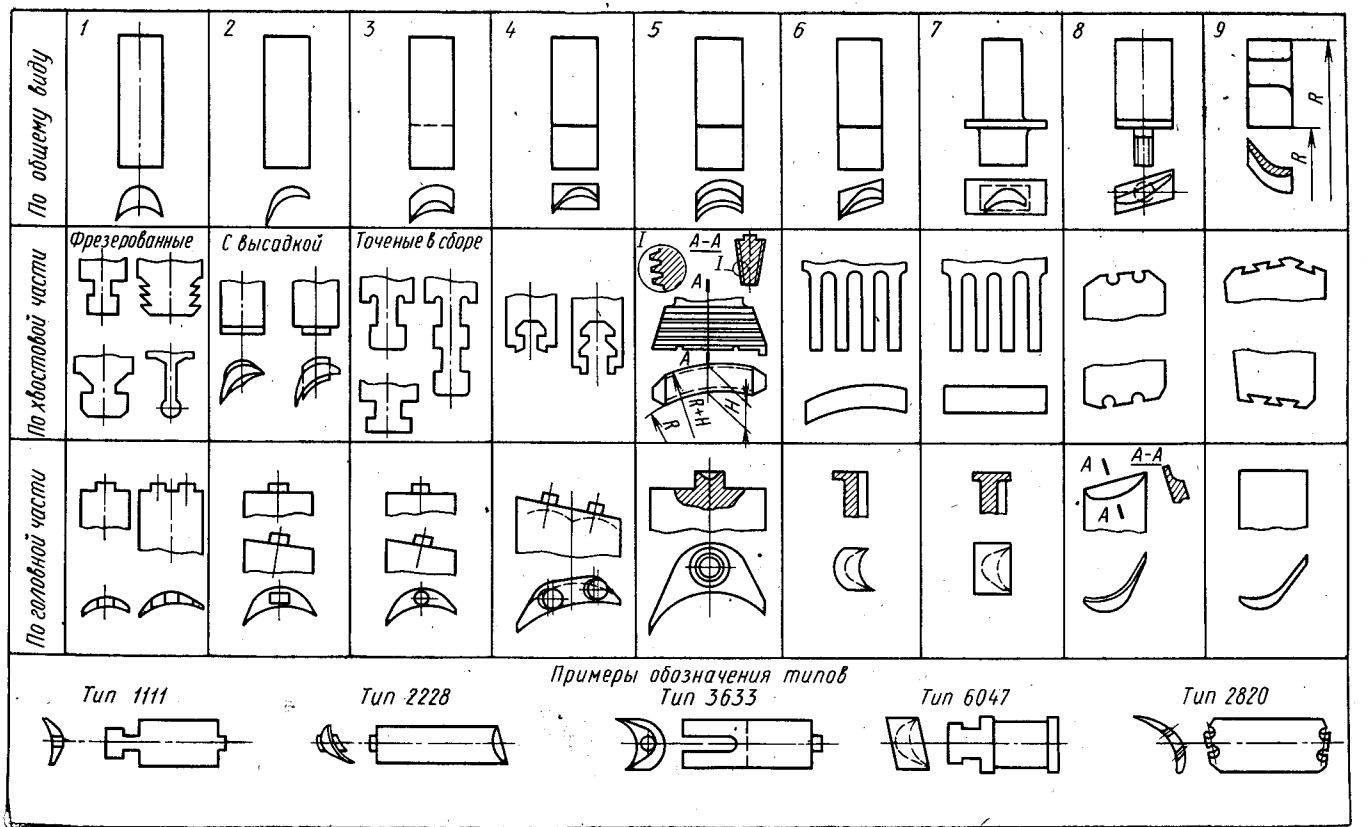


Рис. 26. Схема типизации турбинных лопаток, разработанная Н. Я. Бауманом

Таблица 3

Классификация лопаток по общему виду

Номер класса	Отличительная особенность	Примеры
1	Лопатки активные постоянного сечения, изготовляемые с отдельными промежуточными телами	Рабочие лопатки турбин малой мощности; рабочие и направляющие лопатки колес скорости (см. рис. 8)
2	Лопатки реактивные постоянного сечения, изготовляемые с отдельными промежуточными телами	Рабочие и направляющие лопатки реактивных турбин (см. рис. 9), лопатки литых и сварных диафрагм (рис. 26, тип 2820).
3	Лопатки с пером постоянного сечения, изготовляемые заодно с промежуточными телами, имеющие профильный хвост [1]	Рабочие лопатки активных турбин (рис. 26, тип 3633), рабочие и направляющие лопатки реактивных турбин
4	Лопатки с пером постоянного и переменного сечений (линейчатого[2] и нелинейчатого[3] профиля), имеющие плоский хвост прямоугольного сечения	Рабочие лопатки активных турбин (см. рис. 11, *б*)
5	Лопатки с пером переменного сечения (линейчатого и нелинейчатого профиля), имеющие профильный хвост	Рабочие лопатки активных турбин (рис. 11, *а*), аналогичные им рабочие и направляющие лопатки реактивных турбин
6	Лопатки реактивные с пером постоянного и переменного сечений (линейчатого и нелинейчатого профиля), имеющие плоский хвост непрямоугольного сечения	Рабочие и направляющие лопатки последних ступеней реактивных турбин, газовых турбин и осевых компрессоров
7	Лопатки с развитыми полками у хвостовой части	Рабочие лопатки газовых турбин с охлаждаемыми хвостами
8	Лопатки с цапфами для крепления лопаток	Направляющие лопатки осевых компрессоров газовых турбин
9	Сопла	Направляющие лопатки сегментов сопел и наборных диафрагм (см. рис. 19)

[1] Хвост лопатки с профильными радиальными поверхностями сопряжения соседних лопаток.

[2] Линейчатые профили, получаемые в результате обработки их профильной фрезой методом косого фрезерования или представляющие собой часть поверхности конуса, получаемую в результате точения заготовки в наклонном положении.

[3] Нелинейчатые профили, получаемые в результате: а) обработки заготовок профильной фрезой по спирали; б) обработки заготовок профильной фрезой с перемещением стола станка в продольном направлении в сочетании с дополнительным перемещением стола в вертикальном направлении по копиру; в) обработки заготовки на копировально-фрезерных станках по объемному копиру сложнопространственной формы, заданной рядом кривых, построенных по точкам и расположенных в нескольких параллельных сечениях, перпендикулярных оси лопатки.

Таблица 4

Классификация лопаток по рабочей части

Номер типа	Отличительные признаки	Примеры
1	Открытые[1] постоянного сечения активные	Рис. 8, *а* и *б*
2	Открытые постоянного сечения реактивные, с высадкой и без нее	Рис. 9, *а* и *б*
3	Полуоткрытые[2] постоянного сечения длиной до 100 мм, со своим бандажом и без него	Рис. 26, тип 3633 и рис. 19
4	Полностью закрытые[3] длиной до 100 мм с рабочей частью постоянного сечения	Рис. 26, тип 6047
5	Полузакрытые[4] постоянного и переменного сечения, линейчатые длиной свыше 100 мм	Рис. 18
6	Полузакрытые переменного сечения, нелинейчатые, длиной до 500 мм	Рис. 14
7	Полузакрытые переменного сечения, нелинейчатые, длиной свыше 500 мм	Рис. 61 и 62
8	Открытые переменного сечения, линейчатые	Рис. 20
9	Открытые переменного сечения, нелинейчатые	Рис. 21

[1] Открытые, не имеющие уступов на профильных поверхностях и допускающие сквозные проходы режущих инструментов вдоль всей лопатки.

[2] Полуоткрытые, не имеющие уступов и допускающие сквозной проход режущих инструментов вдоль всей лопатки только по одной из профильных поверхностей. Обычно эти уступы находятся со стороны наружного профиля.

[3] Полностью закрытые, не допускающие как свободного захода, так и свободного прохода режущего инструмента для обработки профилей рабочей части вдоль лопатки.

[4] Полузакрытые, не допускающие сквозного прохода режущих инструментов вдоль лопатки как со стороны наружного, так и внутреннего профиля, но допускающие свободный заход инструмента от головной части.

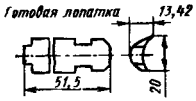
лицах, определены по схеме технологической классификации (см. рис. 26).

Основная задача данных схем — показать порядок обработки лопаток различных типов, поэтому в схемах указаны только порядковые номера операций, их наименования и эскизы обработки. Графы для указания применяемых станков, приспособлений, режущих и измерительных инструментов в таблицах отсутствуют, чтобы не усложнять схемы ненужными в данном случае подробностями.

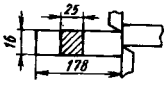
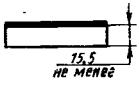
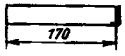
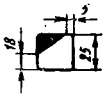
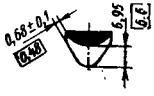
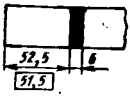
Следует, однако, заметить, что при использовании специальных станков в наименованиях соответствующих операций указаны их марки. Что же касается универсальных станков общего назначения, то указывать их в подобных схемах вообще не целесообразно, так как одни и те же операции можно выполнять на станках разных типов, например на горизонтально-фрезерных, вертикально-фрезерных, продольно-фрезерных и др. Указание в схемах какого-нибудь одного из них может, во-первых, сузить представление читателя о широких возможностях механической обработки и, во-вторых, привести к несоответствию оборудования, указанного в схемах, с фактически применяемым на том или ином турбинном заводе.

Таблица 5

Схема технологического процесса механической обработки лопаток постоянного сечения, активных, с отдельными промежуточными телами (тип 1111)

Готовая лопатка	Заготовка — горячекатаная полосовая сталь
	

Наименование и эскиз операции

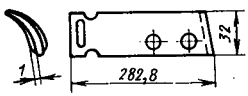
1. Разрезка заготовки на три лопатки на прессе 	2. Правка по мере надобности
3. Шлифование или фрезерование плоскости до получения чистой поверхности 	4. Фрезерование торцов 
5. Фрезерование облегчения наружного профиля 	6. Фрезерование облегчения наружного профиля
7. Фрезерование наружного профиля	8. Фрезерование боков
9. Фрезерование внутреннего профиля 	10. Разрезка на лопатки 

Наименование и эскиз операции	
11. Фрезерование хвоста[1]	12. Фрезерование головки[1]
13. Шлифование и полирование	14. Опиливание по чертежу
15. Магнитное и кислотное испытания	16. Окончательный контроль размеров

[1] При наличии трехшпиндельных станков типа ДФ-21 операции 11 и 12 совмещаются

Таблица 6

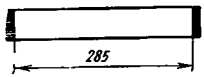
Схема технологического процесса механической обработки лопаток постоянного сечения, реактивных, с отдельными промежуточными телами (тип 2228)

Готовая лопатка	
	Заготовка — горячекатаная полосовая сталь

Наименование и эскиз операции	
1. Отрезка заготовки на прессе	2. Рихтовка заготовки по мере надобности

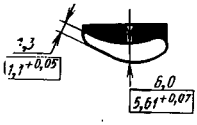
Наименование и эскиз операции

3. Фрезерование торцов

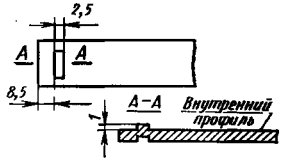


4. Фрезерование наружного профиля

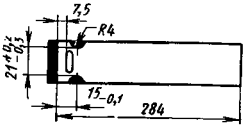
5. Фрезерование внутреннего профиля



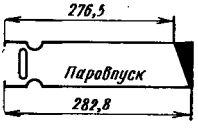
6. Штамповка хвоста[1]



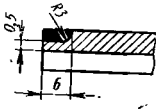
7. Фрезерование пазов хвоста и подрезка



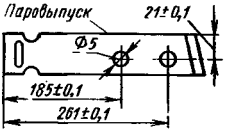
8. Фрезерование скоса на торце у головной части



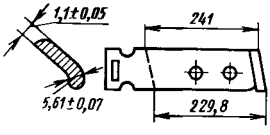
9. Фрезерование утонения



10. Сверление и зенкерование отверстий под проволоку



11. Шлифование и полирование рабочей части лопатки

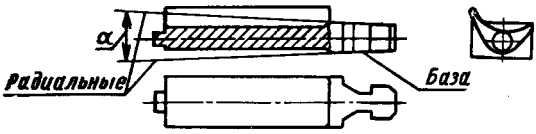


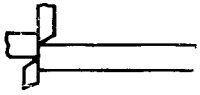
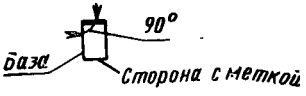
12. Опиливание
13. Окончательный контроль

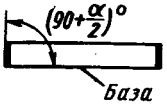
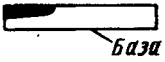
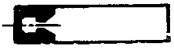
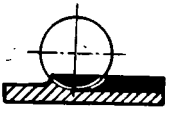
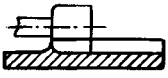
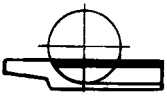
[1] При обработке лопаток с высадкой эта операция выполняется на специальном прессе в холодном состоянии; порядок операций при этом не меняется.

Таблица 7

Схема технологического процесса механической обработки лопатки постоянного сечения с плоским прямоугольным хвостом (тип 4152)

Готовая лопатк	Заготовка — горячекатаная полосовая сталь
	

№ операции	№ стадии	Наименование операции и эскиз
1	1-я — заготовительная	Рубка на прессе 
2		Рихтовка по мере надобности
3	2-я — подготовка основных баз	Фрезерование первой плоскости
4		Шлифование базовой плоскости
5		Фрезерование боков лопатки
6		Шлифование бока лопатки под 90° к базовой плоскости 

№ операции	Номер стадии	Наименование операции и эскиз
7	2-я — подготовка основных баз	Фрезерование торцов 
8	3-я — обработка хвостовой части	Фрезерование внутренней радиальной плоскости хвоста 
9		Фрезерование профиля хвоста 
10	4-я — обработка рабочей части	Фрезерование внутреннего профиля 
11		Фрезерование внутренней галтели 
12		Шлифование внутренней галтели
13		Фрезерование наружного профиля 

№ операции	№ стадии	Наименование операции и эскиз
14	4-я — обработка рабочей части	Фрезерование наружной галтели
15	5-я — обработка головной части	Фрезерование головки[1]
16		Фрезерование припуска на шипе по толщине профиля (на прямоугольник)
17		Обтачивание шипа
18	6-я — отделочная	Шлифование рабочей части
19		Полирование рабочей части
20		Окончательное опиливание
21	7-я — контроль	Магнитное и кислотное испытания
22		Контроль размеров

[1] При наличии трехшпиндельного станка типа ДФ-21 операция 15 может выполняться одновременно с операцией 9; порядок остальных операций при этом не изменяется.

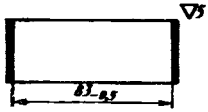
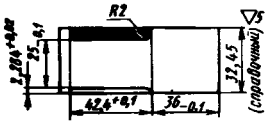
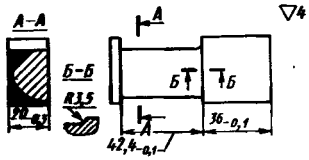
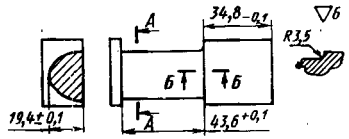
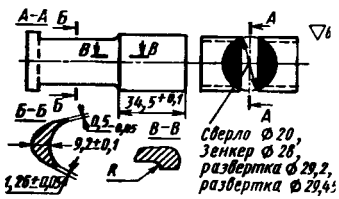
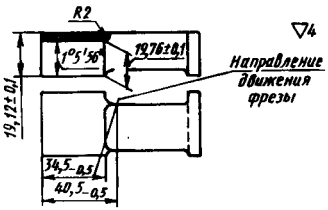
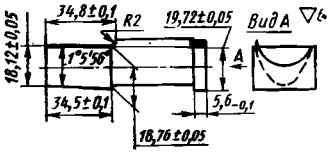
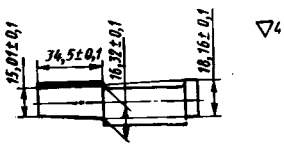
Таблица 8

Схема технологического процесса механической обработки коротких лопаток постоянного сечения с плоским прямоугольным хвостом (тип 4345)

Готовая лопатка	Заготовка — горячекатаная полосовая сталь

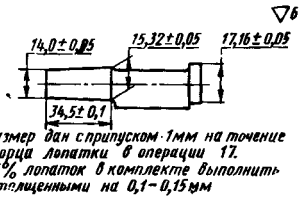
Наименование и эскиз операции

1. Рубка заготовок на прессе	2. Рихтовка по мере надобности
3. Фрезерование первой плоскости	4. Шлифование базовой плоскости (сторона кромок)
5. Фрезерование боковых плоскостей	6. Шлифование боковой плоскости в размер по ширине лопатки (установка на сторону с меткой)

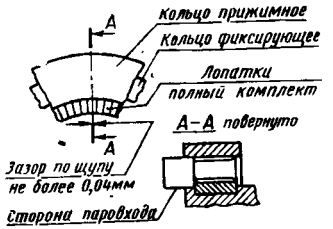
Наименование и эскиз операции	
7. Фрезерование торцов 	8. Фрезерование боков рабочей части на двухшпиндельном станке 
9. Фрезерование наружного профиля обкаткой предварительно 	10. Фрезерование наружного профиля окончательно по копиру на станке 6М42К 
11. Сверление и развертывание внутреннего профиля на револьверном станке 	12. Фрезерование внутренней радиальной плоскости предварительно 
13. Фрезерование внутренней радиальной плоскости окончательно 	14. Фрезерование наружной радиальной плоскости предварительно 

Наименование и эскиз операции

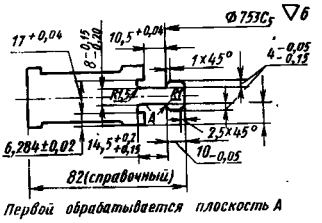
15. Фрезерование наружной радиальной плоскости окончательно



16. Сборка лопаток в приспособление для точения профиля хвоста

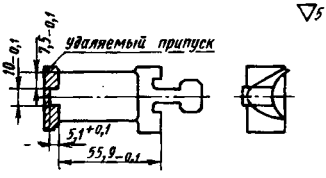


17. Точение профиля хвоста с переустановкой приспособления в сборе с лопатками

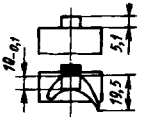


18. Разборка приспособления, снятие лопаток и опиловка заусениц напильником

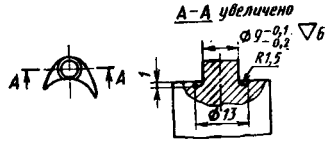
19. Фрезерование головки



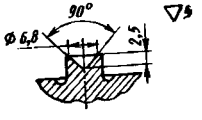
20. Фрезерование припуска на шипе по толщине профиля



21. Обтачивание шипа



22. Сверление лунки шипа



Наименование и эскиз операции	
23. Шлифование и полирование рабочей части	24. Опиливание фаски 2×45° и кромок лопатки по чертежу
25. Магнитное и кислотное испытания	26. Окончательный контроль

Таблица 9

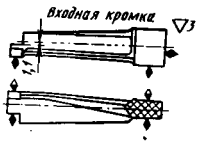
Схема технологического процесса механической обработки лопатки переменного сечения нелинейчатой формы с плоским прямоугольным хвостом (тип 4768)

Готовая лопатка	
Профиль лопатки № 1178 ЛМЗ Профиль хвоста № 551 ЛМЗ	Заготовка — штамповка

Наименование и эскиз операции	
1. Контроль заготовки и правка по мере надобности	2. Фрезерование внутренней радиальной плоскости у хвоста предварительно; бобышки и торцов — окончательно

Наименование и эскиз операции

3. Фрезерование боковой плоскости хвоста и бобышки со стороны входной кромки

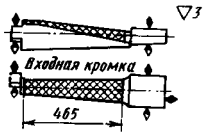


4. Фрезерование наружной радиальной плоскости хвоста (предварительно) и бобышки

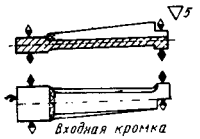
5. Фрезерование боковой плоскости хвоста и бобышки со стороны выходной кромки

6. Перенос обозначения шифра материала и порядкового номера на торец хвоста

7. Фрезерование наружного профиля предварительно по копиру на копировально-фрезерном станке УФ-30



8. Фрезерование внутренней галтели предварительно по копиру, на копировально-фрезерном станке ОФ-31М

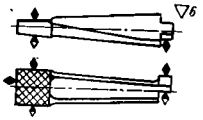
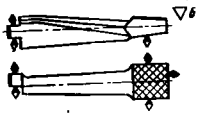
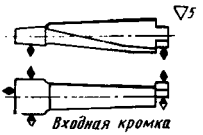
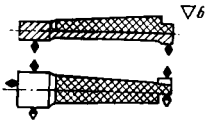
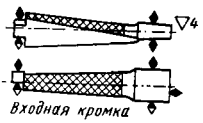
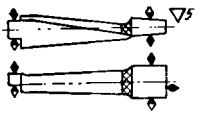
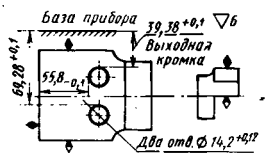
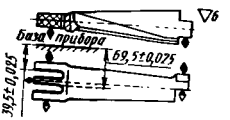


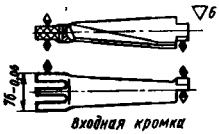
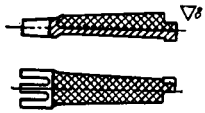
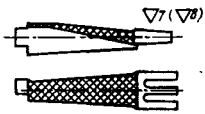
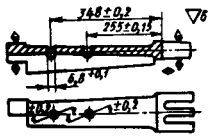
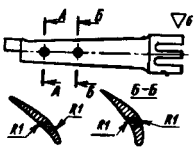
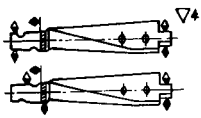
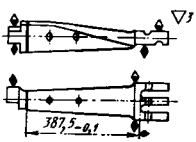
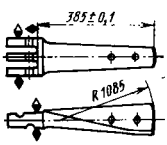
9. Фрезерование внутренней галтели окончательно на станке ОФ-31М, по копиру (см. эскиз 8)

10. Строгание внутреннего профиля предварительно на копировально-строгальном станке ГД-19

11. Фрезерование входной кромки

12. Фрезерование выходной кромки

Наименование и эскиз операции	
13. Фрезерование внутренней радиальной плоскости окончательно 	14. Фрезерование наружной радиальной плоскости окончательно 
15. Строгание выходной кромки со стороны внутреннего профиля на копировально-строгальном станке ГД-19 	16. Строгание внутреннего профиля окончательно на копировально-строгальном станке ГД-20 
17. Фрезерование наружного профиля окончательно по копиру на станке УФ-30 	18. Фрезерование наружной галтели по копиру на станке ОФ-31М[1] 
19. Сверление и зенкование отверстий под прорезку пазов хвоста 	20. Фрезерование пазов хвоста с припуском на шлифование 

Наименование и эскиз операции	
21. Шлифование пазов на специальном станке[2] 	22. Шлифование и полирование внутреннего профиля 
23. Шлифование и полирование наружного профиля 	24. Сверление и зенкерование отверстий под скрепляющую проволоку 
25. Обработка галтелей у отверстий под проволоку 	26. Опиливание кромок и фасок лопатки по чертежу
27. Окончательный контроль размеров рабочей части	28. Фрезерование полуотверстий в хвосте под заклепки 
29. Отрезка технологического припуска 	30. Фрезерование торца головки по радиусу 

Наименование и эскиз операции	
31. Фрезерование утонения головки	32. Шлифование утонения и глянцевание рабочей части (безразмерное полирование)
33. Контроль на дефектоскопе	34. Развешивание лопаток на моментных весах

Обозначения

◆ – *базы*

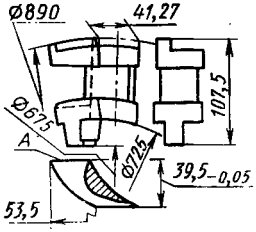
◆ – *прижим*

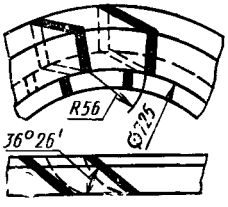
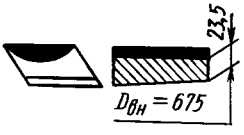
[1] При наличии токарно-копировальных станков возможна обработка галтели точением.

[2] Более целесообразным, как показали опыты, должно стать протягивание (после полного освоения этого метода).

Таблица 10

Схема технологического процесса механической обработки направляющих лопаток наборных диафрагм (тип 9047)

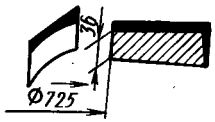
Готовая лопатка	
	Заготовка — поковки полукольцами. Поступают на обработку проточенными по наружной и внутренней поверхностям и в размер 39,5 мм

Наименование и эскиз операции	
1. Разрезка кольца на заготовки[1] 	2. Фрезерование внутреннего профиля 

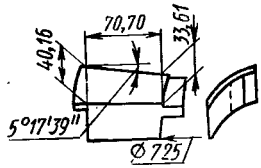
[1] При изготовлении заготовок методом точного литья точение лопаток производится в специальном многоместном приспособлении. До установки в приспособление у заготовок фрезеруется базовая плоскость *А*. При таком методе отпадают операции 1, 3, 5, 6; последние три — вследствие малых припусков на литых заготовках.

Наименование и эскиз операции

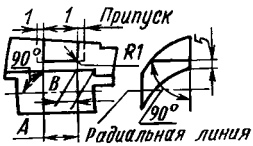
3. Фрезерование наружного профиля предварительно под радиальным углом



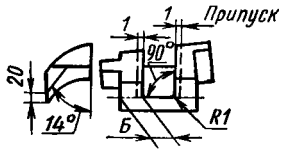
4. Фрезерование наружного профиля окончательно под радиальным углом



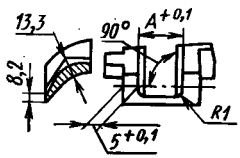
5. Фрезерование парового канала предварительно со стороны паровпуска



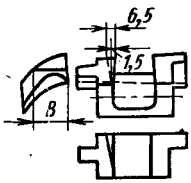
6. Фрезерование парового канала предварительно со стороны паровыпуска



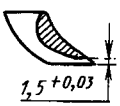
7. Фрезерование наружного профиля парового канала по копиру на станке типа ОФ-31М или 6М42К



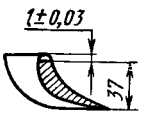
8. Фрезерование развала парового канала



9. Фрезерование кромки паровыпуска



10. Фрезерование кромки паровпуска



Наименование и эскиз операции	
11. Слесарная обработка парового канала	12. Шлифование и полирование парового канала и внутреннего профиля только на длине канала
13. Опиливание кромок	14. Окончательный контроль и кислотное испытание

Таблица 11

Схема технологического процесса изготовления лопаток постоянного и переменного сечений из листовой стали (тип 0900)

Готовая лопатка	Заготовка — светлокатаная листовая сталь
Наименование и эскиз операции	
1. Разрезка листа на заготовки	2. Рихтовка заготовок
3. Строгание пакета заготовок по контуру[1]	4. Долбление пазов в пакете

[1] Операции 3 и 4 могут выполняться одновременно.

Наименование и эскиз операции	
5. Фрезерование скоса на выходной кромке	6. Фрезерование радиуса на входной кромке
7. Штамповка лопатки	8. Полировка концов лопатки
9. Опиливание по чертежу	10. Лужение концов лопатки на длине 20 мм под заливку
11. Магнитное и кислотное испытания	12. Окончательный контроль

Таблица 12

Схема технологического процесса механической обработки рабочей лопатки компрессора газовой турбины (тип 4369)

Готовая лопатка	Заготовка — штамповка

Наименование и эскиз операции	
1. Фрезерование торцов заготовки	2. Фрезерование центров с двух сторон заготовки

Наименование и эскиз операции	
3. Фрезерование боковых сторон хвоста	4. Предварительное фрезерование наружной радиальной плоскости хвоста с припуском 1—0,5 мм
5. Чистовое фрезерование наружной радиальной плоскости хвоста	6. Предварительное фрезерование внутренней радиальной плоскости хвоста с припуском 1—0,5 мм
7. Чистовое фрезерование внутренней радиальной плоскости хвоста	8. Опиливание заусенцев
9. Предварительное фрезерование под обработку профиля хвоста с припуском 0,5 мм на сторону	10. Фрезерование профиля хвоста окончательное
11. Фрезерование галтелей на копировально-фрезерном станке типа 642К	12. Фрезерование входной и выходной кромок по радиусу на копировально-фрезерном станке
13. Чистовое фрезерование внутреннего профиля на копировально-фрезерном станке	14. Чистовое фрезерование наружного профиля на копировально-фрезерном станке

Наименование и эскиз операции	
15. Фрезерование галтельной части (до начала галтелей) на копировально-фрезерном станке типа 642К Опилить заусенцы 1–2	16. Шлифование профиля лопатки на ленточно-шлифовальном станке ЛШ-1
17. Шлифование корневой части профиля пера и галтелей. Полирование рабочей части и галтелей	18. Опиливание кромок и полная слесарная отделка лопатки
19. Окончательный контроль рабочей части по профилю и по размерам радиальной и аксиальной установки	20. Фрезерование торца хвоста
21. Выбор металла в хвостовике для облегчения лопатки	22. Отрезка технологического припуска 153,8–0,5
23. Опиливание заусенцев. Контроль внешним осмотром	24. Проверка лопатки люминесцентным методом
25. Полирование (безразмерное) рабочей части	26. Взвешивание лопаток на моментных весах

Приспособления и измерительные инструменты в лопаточном производстве применяются, как правило, специальные. Изучению применяемого оборудования и технологического оснащения лопаточного производства посвящен следующий раздел книги.

Анализ схем позволяет установить определенную закономерность в технологических процессах обработки лопаток, что наглядно показано в табл. 7. Из таблицы видно, что технологические процессы изготовления лопаток могут быть разделены на семь стадий: *1* — заготовительная; *2* — подготовка основных технологических баз; *3* — обработка хвостовой части; *4* — обработка рабочей части; *5* — обработка головки; *6* — отделочная; *7* — контроль. Каждая стадия состоит из нескольких технологических операций, количество и содержание которых зависит от конструкции элементов лопаток, показанных в схеме классификации. Рассмотрение приведенных схем дает возможность выделить из общей массы большую группу типовых технологических операций. Карты для всех типовых операций могут быть разработаны заранее в виде так называемых слепышей, т. е. операционных карт с эскизами, но без указания на эскизах конкретных размеров обработки.

Технологический процесс обработки любой новой лопатки может быть легко и быстро разработан технологом при наличии классификатора и типовых технологических операций. Номенклатура операций, представленная в табл. 5—8, рассчитана на использование заготовок из полосовой стали, однако и при более совершенных заготовках (например, штамповках) общий порядок обработки детали в основном сохраняется. Исключаются только операции предварительной обработки, вызванные необходимостью удаления напусков, т. е. излишних припусков, имеющих размеры, бо́льшие установленных по нормалям или по расчету, что обычно имеет место при изготовлении деталей из полосовой горячекатаной заготовки. После выполнения заготовительных операций и подготовки основных баз (см. табл. 7) обрабатывают хвост, затем рабочую часть и, наконец, головку.

Такой порядок обработки обеспечивал и все еще обеспечивает необходимое качество лопаток при сравнительно небольшой их длине, равной, например, 500—750 мм. С появлением более длинных лопаток этот порядок оказался неудовлетворительным, так как при облопачивании турбин стали обнаруживаться увеличенные погрешности радиальной и аксиальной установки лопаток. Этот пример показывает, что при установлении порядка обработки следует учитывать особенности конструкции лопаток и требования к их установке. У коротких лопаток целесообразно начинать чистовую обработку с хвоста, так как длина хвоста сравнительно мало отличается от длины пера, и хвост в таком случае может служить надежной базой для обработки пера. Наоборот, при большой длине пера лопатки и сравнительно малой длине хвоста последний перестает быть надежной базой для

обработки пера. Поэтому в таком случае обработку лопаток надо начать с пера и, уже базируясь на него, обработать радиальные поверхности хвоста, а может быть, и весь посадочный профиль, что определяется опытным путем. Эти соображения следует учитывать и при использовании точных штампованных заготовок, имеющих припуск по перу только на шлифование.

8. Виды заготовок и их влияние на технологические процессы обработки лопаток

Для изготовления лопаток применяются следующие виды заготовок: полосовая сталь, листовая сталь, поковки, штамповки, горячекатаные профильные полосы, холоднокатаные профильные полосы (так называемый светлокатаный профиль) и точное литье по выплавляемым моделям. Наиболее распространенными заготовками для лопаток являются светлокатаный профиль и штамповки.

Вид заготовки оказывает большое влияние на последующий технологический процесс обработки, поэтому при выборе рациональных заготовок следует учитывать все конкретные условия производства и, в частности, форму лопаток, их количество и сроки выполнения заказов. Например, при изготовлении лопаток типа 1111 из полосовой стали (из бруска) необходимо выполнить 15 операций (см. табл. 5). При изготовлении тех же лопаток из светлокатаного профиля количество операций значительно сокращается: выпадают первые девять операций, связанные с получением профильной заготовки, и отделочная операция, так как светлокатаные профильные заготовки имеют готовый профиль, не требующий ни шлифовки, ни полировки. Однако применение светлокатаного профильного материала рентабельно только при больших количествах заготовок одного профиля. Условие, при котором становится целесообразным применение светлокатаного профиля, состоит в том, чтобы полная стоимость погонного метра проката была меньше стоимости такого же количества фрезерованной заготовки. С целью увеличения рентабельности при использовании светлокатаного профиля, в некоторых конструкциях турбин один и тот же профиль лопаток применяется на большом количестве ступеней. Кроме того, этот же профиль применяется и на ряде ступеней в других турбинах.

Штампованные заготовки применяются для изготовления крупных и мелких лопаток. Современные методы штамповки позволяют получить заготовки с весьма малыми припусками: 1—3 мм на сторону для крупных лопаток и 0,3 мм — для мелких. Применение штампованных заготовок сокращает расход металла и затраты труда. Чем длиннее рабочая часть лопатки и чем больше закрутка профиля, тем больше экономия. Коэффициент использования металла при штампованных заготовках

может быть доведен до 0,5 и выше. Другим преимуществом штампованной заготовки является упрочнение металла.

Целесообразность применения того или иного вида заготовки при нескольких возможных вариантах следует определять расчетом себестоимости лопатки. Штампованные заготовки крупных лопаток должны иметь на головной части специальные утолщения (технологические припуски) для создания базовых плоскостей, необходимых для фиксирования лопаток при установке их в приспособлениях (рис. 27 и табл. 9). При серийном производстве турбин рациональной заготовкой для направляющих лопаток типов, указанных на рис. 19, 20 и 22, является точное литье по выплавляемым моделям.

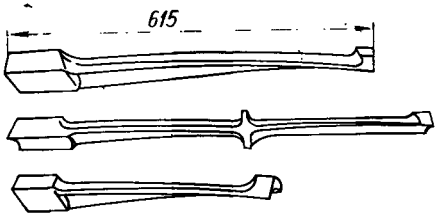
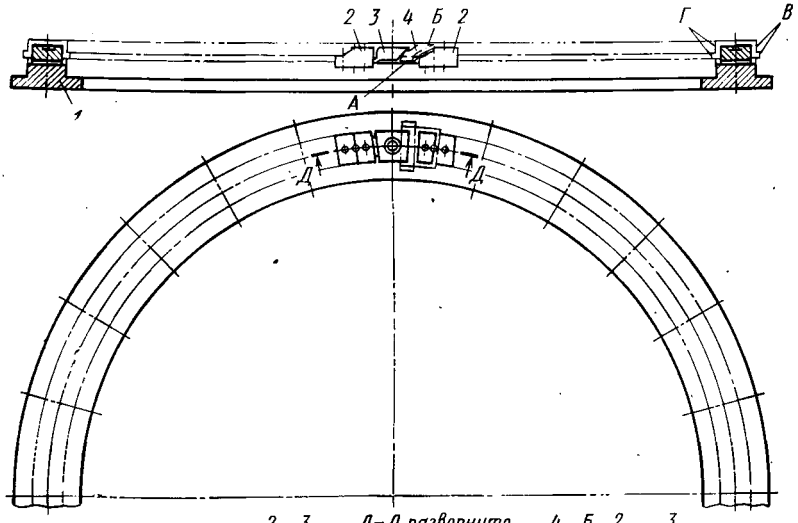


Рис. 27. Формы штампованных заготовок для рабочих лопаток



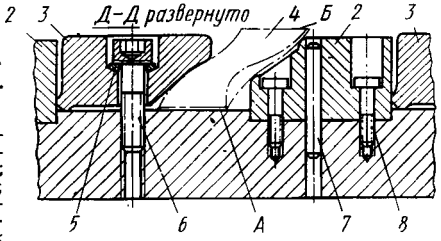


Рис. 28. Многоместное приспособление для точения литых заготовок лопаток диафрагм:

1 — основание; *2* — подушки; *3* — прижимы; *4* — обрабатываемые лопатки; *5* — сферические шайбы; *6* — болты крепления лопаток; *7* — штифты; *8* — винты крепления подушек

При единичном изготовлении лопаток диафрагм типа, показанного в табл. 10, рациональными заготовками являются поковки в виде полуколец, загнутых из прямоугольных полос. Полукольца после загибки в горячем виде стыкуются и протачиваются на карусельном станке по форме продольного сечения готовой лопатки. После обработки на станке полукольца принимают окончательные чертежные размеры по ширине, хвостовому и головному торцам. Дальнейшая обработка производится по технологическому процессу, приведенному в табл. 10.

При изготовлении лопаток из проката или литых заготовок целесообразно начать обработку с фрезерования поверхности *А* (см. эскиз готовой лопатки табл. 10) как базовой для укладки лопаток в многоместное приспособление (рис. 28). После закрепления заготовок в приспособлении точить торцовые поверхности *В*, *Г* и боковую сторону *Б* аналогично кольцевой заготовке. Дальнейшая обработка может производиться в порядке, указанном в табл. 6—8. С производством светлокатаных профилей, штампованных заготовок, литья по выплавляемым моделям можно познакомиться по отраслевой литературе [4].

9. Выбор и подготовка основных баз

Как видно из схем, приведенных в табл. 5—12, для изготовления лопаток в зависимости от сложности их формы требуется выполнить 10—26 операций на различных металлорежущих станках. В турбинах используются и еще более сложные лопатки, требующие применения и более сложных технологических процессов.

Обработка лопаток, производимая по всем четырем сторонам заготовки, обязательно сопровождается сменой баз, т. е. необходимостью устанавливать заготовки под обработку на различные поверхности. Основными являются те из базовых поверхностей лопаток, которые создаются в самом начале обработки заготовки и используются в качестве установочных при выполнении большинства последующих операций.

Для достижения высокого качества лопаток следует стремиться к тому, чтобы основные элементы лопаток (хвосты, рабочие части, головки) были обработаны без смены баз. Если же этого достигнуть нельзя и смена баз является неизбежной, то правильному выбору и подготовке основных баз должно быть уделено особое внимание.

Операции, относящиеся к подготовке основных баз, должны выполняться наиболее тщательно. Важнейшим требованием является строгая перпендикулярность и параллельность базовых плоскостей между собой, что обеспечивается определенной очередностью операций с выдерживанием норм точности, указанных для примера в операционных эскизах табл. 8.

Обработку прямоугольной горячекатаной заготовки начинают всегда с более широкой поверхности. В операции 3 (см. табл. 8) создается первая исходная плоскость. В операции 4 шлифованием на магнитной плите достигается параллельность между двумя плоскостями — исходной и противолежащей с точностью около 0,01 мм. Выдерживается также толщина заготовки с точностью 0,05 мм. В операции 5 производится одновременное фрезерование боковых сторон заготовки с выдерживанием перпендикулярности одной из сторон, указанной в эскизе, к шлифованной плоскости. При этом вследствие неточности оборудования вторая сторона может оказаться и не параллельной к первой, указанной в эскизе, а следовательно, и не перпендикулярной к шлифованной. Для исключения этого явления в операции 6 — «шлифование боковой плоскости в размер по ширине», выполняемой на магнитной плите и предусмотренной не только для достижения размера по ширине, но и для обеспечения параллельности боковых сторон между собой, заготовки надо укладывать на магнитную плиту обязательно стороной с меткой.

При точном соблюдении указанного порядка все четыре поверхности обработанной заготовки окажутся взаимно перпендикулярными и любая из них сможет служить базой, что крайне необходимо для правильного положения заготовок в приспособлениях для обработки хвостов, рабочих частей и головок, с целью обеспечения необходимой точности взаимного расположения и относительных поворотов этих элементов между собой. При несоблюдении указанных выше требований в процессе обработки будут нарушены размеры и формы лопаток, что приведет к дополнительным затратам рабочего времени на их слесарную пригонку при облопачивании турбин.

В производстве лопаток применяется несколько типов технологических баз. Способы базирования определяются классом лопаток. На рис. 29 показаны способы базирования лопаток наиболее распространенных форм. Обозначение баз на рисунке выполнено в виде открытых равносторонних треугольников. Цифры указывают число опорных точек. При одной точке цифра не ставится. Типы условно обозначены римскими цифрами.

В качестве базовых поверхностей используются как плоскости, так и профильные поверхности, однако наилучшими из них являются плоскости. Профильные поверхности могут служить надежными базами только при постоянном сечении и в сочетании с плоскостями (типы *I*, *II*, *IV*, *X*). При переменном сечении профильные поверхности не могут служить надежными базами и должны заменяться плоскостями, создаваемыми искусственно на технологических припусках. Технологические припуски показаны на рис. 29 у типов *V*, *VI*, *VII*, *VIII*, *IX*, где отмечены буквой *а*. Из приведенных способов базирования нашли отражение в схемах: тип *I* (см. табл. 5), тип *II* (см. табл. 6), тип *III*

(см. табл. 8), тип *VII* (см. табл. 9), тип *X* (см. табл. 10), тип *V* (см. табл. 12).

Все приведенные на рис. 29 типы базирования обеспечивают единство баз для большинства операций механической обработки соответствующего типа лопаток. Наиболее полно принцип единства баз выдерживается при использовании в качестве установочных баз центровых отверстий (типы *V*, *VI*, *IX*). Этот способ наиболее целесообразен при обработке лопаток сложной формы.

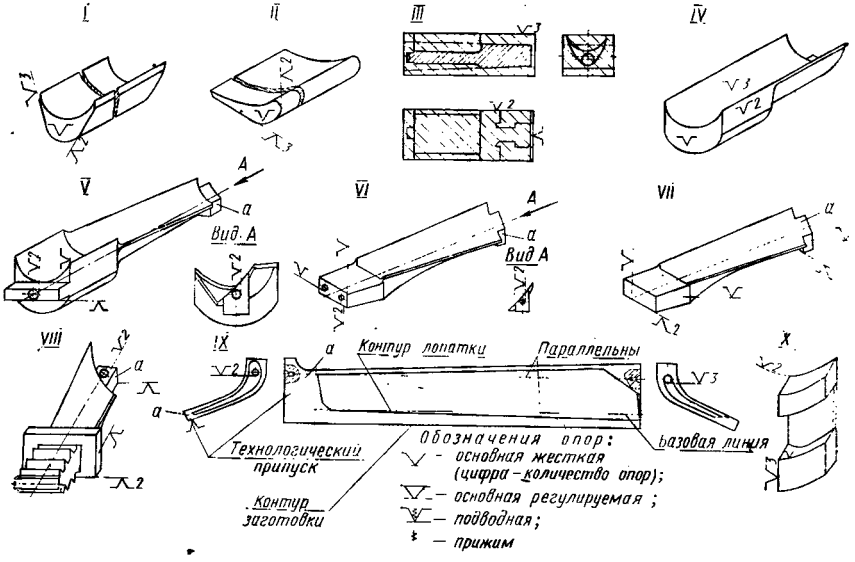


Рис. 29. Схемы базирования лопаток различных типов

Хорошие результаты были получены на Турбомоторном заводе при обработке в центрах направляющих лопаток сложной пространственной формы длиной 1070 мм (тип *IX*, рис. 29). Центровые отверстия на торцах заготовки сверлились в районе, соответствующем максимальной толщине наибольшего сечения. Осевая линия центровых отверстий располагалась параллельно базовой линии сечений профиля лопатки. Со стороны малого сечения для возможности размещения центрового отверстия предусматривался технологический припуск.

Наличие центров лишает заготовку пяти степеней свободы. Опорная точка, лишающая заготовку шестой степени свободы — возможности вращения вокруг оси центров, располагается на одной из других поверхностей лопатки. В примере обработки направляющих лопаток типа *IX* на ТМЗ эта точка располагалась на технологическом припуске шириной 10 мм, предусмотренном на всей длине выходной кромки.

Хорошо зарекомендовал себя способ (тип *VIII*) для обработки коротких лопаток сложного профиля. Отверстие, выполненное по второму классу точности, достаточно надежно лишает заготовку двух степеней свободы.

10. Типовые операции. Оборудование и оснащение лопаточного производства

Обработка заготовок. Разрезка материала на заготовки выполняется на прессах, дисковыми пилами, механическими ножовками и на станках для анодно-механической резки металла. Для разрезания листовой стали применяются гильотинные ножницы.

Наиболее производительным способом разрезания является рубка на прессе. Размеры поперечного сечения полос ограничиваются мощностью пресса. В настоящее время существуют прессы такой мощности, при которой полосы всех размеров, применяемые в производстве лопаток, могут подвергаться рубке. Припуск по длине заготовки оставляется равным 3—6 мм, в зависимости от поперечного сечения полосы. Такой припуск необходим для последующего фрезерования торцов заготовки, которые после рубки на прессе имеют вмятины и часто получаются косыми. Рубка материала светлокатаного профиля производится в специальных штампах, имеющих профильные пуансон и матрицу, предохраняющие профиль от деформирования при рубке. Небольшая вмятина, образующаяся на профиле от нажимания пуансоном, снимается при закруглении шипа.

При разрезке дисковыми пилами или ножовочными станками припуск по длине заготовки оставляется не более 1 мм на сторону.

Разрезка заготовок из труднообрабатываемых высокотвердых сталей может производиться на анодно-механических станках, так как применение дисковых пил в этом случае крайне затруднительно. Припуск по длине лопатки при анодно-механической резке, так же как и при резке дисковыми пилами, дается небольшой. Торцы после анодно-механической резки получаются правильными.

После разрезки проверяются размеры заготовок по длине и на кривизну. Искривленные заготовки выправляются при помощи пресса. Операция правки должна обязательно вноситься в технологический процесс изготовления заготовок, так как их кривизна существенно затрудняет дальнейшую обработку лопаток и может привести к браку. Допустимая величина кривизны определяется размером стрелки дуги прогиба заготовки, которая должна быть не больше $^1/_3$ припуска на механическую обработку.

Фрезерование плоскостей заготовки производится нормальными цилиндрическими фрезами на горизонтально-фрезерных

станках или торцовыми фрезами на вертикально-фрезерных станках. Работа торцовыми фрезами обеспечивает лучшее качество плоскостей и дает возможность применять скоростные режимы фрезерования.

Фрезерование боков заготовки производится в универсальных приспособлениях, один из типов которых показан на рис. 30. Заготовка устанавливается на фрезерованную плоскость и прижимается системой прижимных рычагов, обеспечивающих правильность положения заготовки и надежность ее крепления.

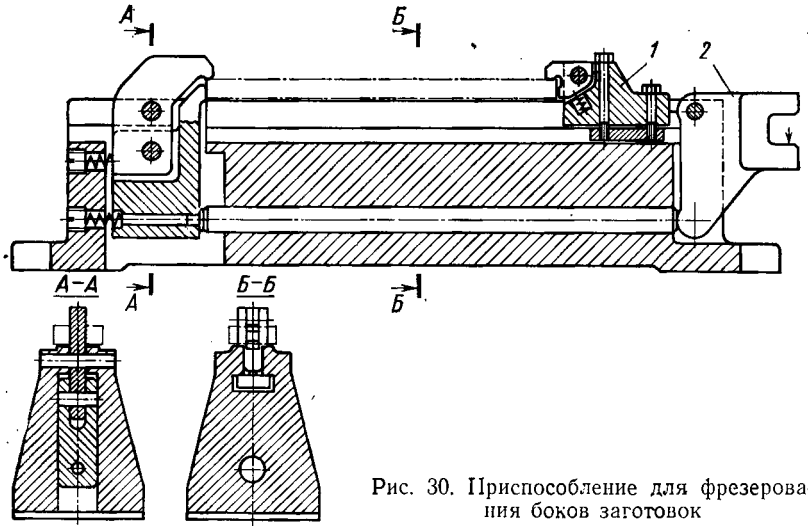


Рис. 30. Приспособление для фрезерования боков заготовок

Зажим производится от пневматического силового узла, который давит на рычаг *2*. Действие системы рычагов ясно без описания. Путем предварительного перемещения опоры *1* приспособление может перестраиваться для обработки лопаток различных длин. Фрезеровать бока заготовки наиболее целесообразно на двухшпиндельных горизонтально-фрезерных станках модели А-662 торцовыми фрезами. При отсутствии таких станков эта операция может производиться на горизонтально-фрезерных станках парой двусторонних фрез, установленных на оправке.

Шлифование плоскостей заготовок на магнитном столе обеспечивает высокую точность и параллельность обработанных плоскостей, что является необходимым при подготовке основных баз; при этом увеличивается и производительность предварительно выполняемых фрезерных работ за счет возможности некоторого снижения точности обработки при фрезеровании под шлифование. Шлифование производится торцовыми и сегментными кругами крупнозернистыми, мягкими или средней твердо-

сти, на плоскошлифовальном станке. Заготовки располагаются по всей плоскости магнитного стола в большом количестве, что делает операцию шлифования очень производительной. Припуск на шлифование в зависимости от размеров заготовки оставляется от 0,1 до 0,3 мм.

Фрезерование торцов коротких заготовок производится пакетами при закреплении их в станочных тисках или в специальных приспособлениях. Выполняется оно аналогично фрезерованию боков лопатки торцовыми фрезами на станках модели А-662 или парой двусторонних фрез, надетых на оправку. Фрезерование парой фрез обеспечивает однородность длины заготовок, что очень важно для дальнейшей их обработки при установке на приспособления.

Обработка хвостов лопаток производится после получения правильных основных баз. Как указывалось выше хвост, является ответственной частью лопатки. При обработке хвостов лопаток, изготовляемых заодно с промежуточным телом, должны быть точно выполнены угол между внутренней и наружной радиальными сопрягаемыми поверхностями, толщина, длина и посадочный профиль обрабатываемой детали.

Обработка хвостовой части лопатки начинается с образования требуемого угла между внутренней и наружной радиальными поверхностями. Первоначально обрабатывают внутреннюю, а вслед за ней наружную поверхности. Эти операции должны обязательно предшествовать фрезерованию посадочного профиля, так как наличие его затруднило бы проверку правильности обработки поверхностей угла.

Для получения правильной и чистой плоскости фрезерование разделяется на предварительное и окончательное. Предварительное фрезерование обычно выполняется на горизонтально-фрезерном станке цилиндрической фрезой. Чистовое фрезерование выполняется на вертикально-фрезерном станке торцовой фрезой. Припуск на чистовую обработку оставляется от 0,5 до 1 мм.

Проверка радиального угла производится при помощи специального шаблона (рис. 31). Конструкция шаблона обеспечивает проверку радиального угла и толщины хвоста. При правильном радиальном угле хвост лопатки должен заходить в шаблон без просвета, однако точность проверки данным шаблоном в значительной степени зависит от опытности контролирующего работника, так как изготовление радиального угла абсолютно без просвета практически является недостижимым. У лопаток с плоскими хвостами просвет может быть проконтролирован щупом и не должен превышать 0,02—0,03 мм. Толщина хвоста контролируется при помощи рисок, нанесенных на шаблон. Выполняется толщина с определенным допуском. При правильной толщине торцовая плоскость хвоста должна находиться между контрольными рисками.

Одна десятая часть всех лопаток данной ступени должна иметь хвосты, утолщенные на 0,15—0,2 мм. Это необходимо для создания запаса на пригонку лопаток при их наборке. Для изготовления утолщенных хвостов лопаток на шаблоне наносится еще одна риска с надписью «УТ». На утолщенные лопатки также наносятся клейма «УТ», что дает возможность быстрого отбора таких лопаток при установке их на диски.

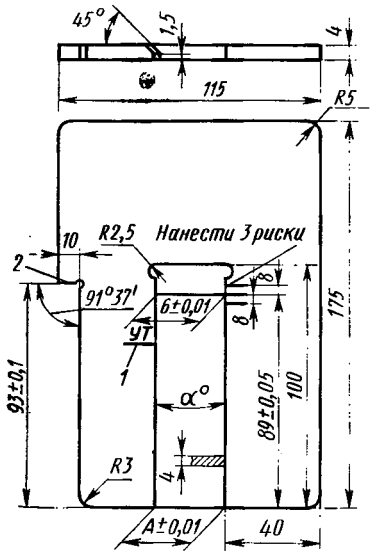


Рис. 31. Шаблон для проверки радиального угла хвостов лопаток:
1 — риска утолщенных хвостов; *2* — упор для контроля длины

С целью обеспечения необходимой точности проверки радиальных углов у лопаток, имеющих плоский прямоугольный хвост, рекомендуется применять тригонометрические методы измерения с помощью синусных линеек и индикаторов по схеме, приведенной на рис. 32. Схема измерения угла крупных лопаток показана на рис. 33. На этом рисунке: *1* — проверяемая лопатка; *2* — жесткие упоры, настраиваемые в соответствии с чертежом лопатки; *3* — клиновые подводные опоры, обеспечивающие контактирование выходной кромки лопатки с упорами *2*; *4* — установ; *Л*, *Б*, *К*, *Л* — чертежные размеры, обеспечивающие горизонтальное положение внут-

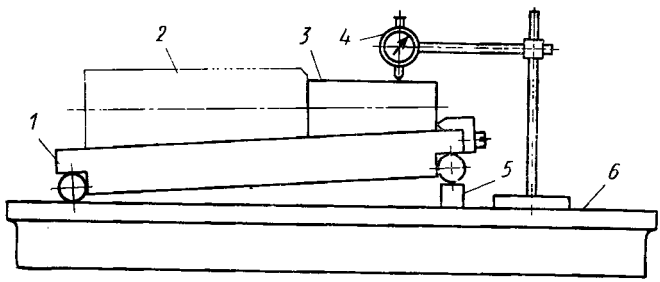


Рис. 32. Схема контроля радиального угла с помощью синусной линейки:
1 — синусная линейка; *2* — проверяемая лопатка; *3* — эталон; *4* — индикатор; *5* — мерная плитка; *6* — контрольная плита

ренней радиальной плоскости *Ж*; *И* — радиальная линия при рабочем положении лопатки на колесе; *Д*, *Е* — базовые плоскости для фиксации лопатки относительно оси; *В* и *Г* — расчетные размеры. Из рисунка видно, что при контроле радиальных уг-

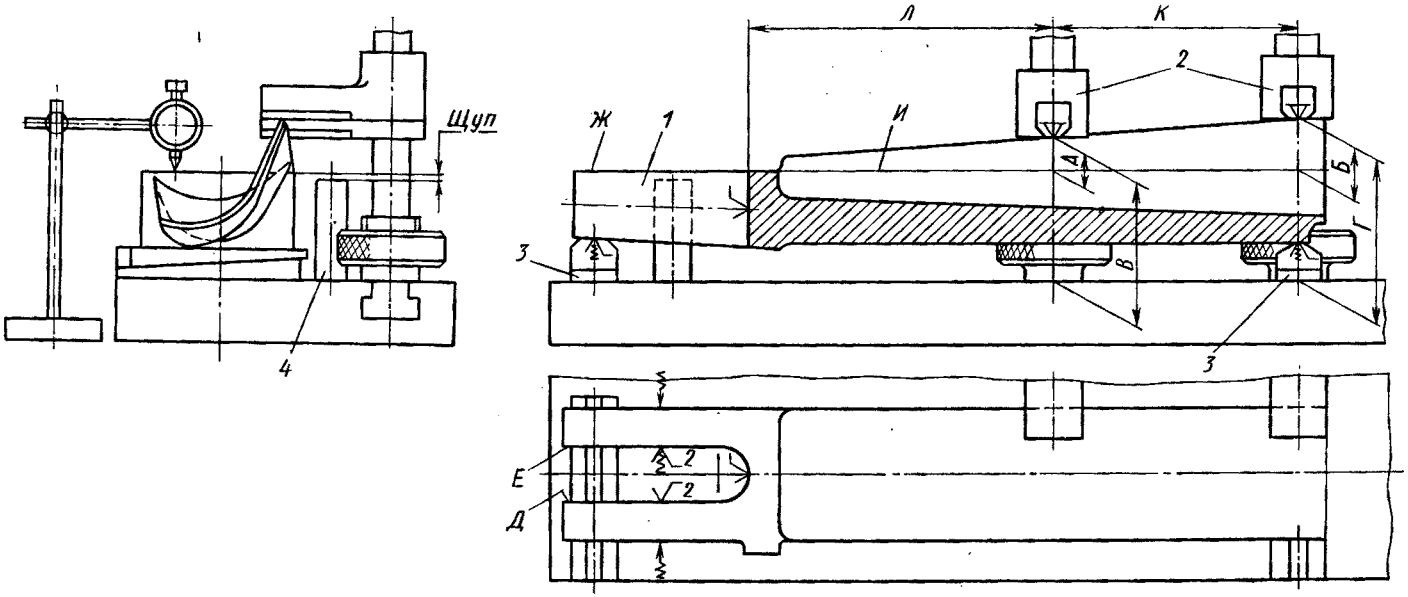


Рис. 33. Схема установки для измерения и чистовой обработки радиальных поверхностей хвоста лопатки

лов по данной схеме проверяется правильность не только величины радиального угла, но и расположение хвоста относительно рабочей части лопатки. Толщина хвоста контролируется по эталону *3* (см. рис. 32).

Фрезерование наружного профиля у лопаток диафрагм под радиальным углом отличается некоторыми особенностями. Профили лопаток диафрагм имеют сильно вытянутую реактивную форму. Если фрезерование радиального угла у лопаток этого

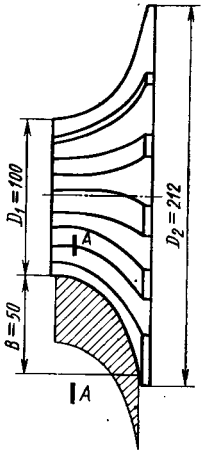


Рис. 34. Фреза для обработки лопатки в рабочем положении

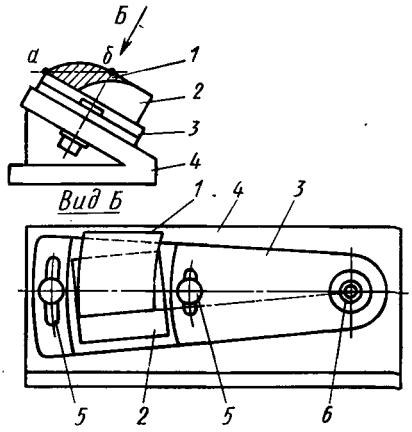


Рис. 35. Схема приспособления для обработки наружного профиля направляющей лопатки под радиальным углом при повернутом положении лопатки

типа производить в рабочем положении, то, учитывая, что радиальный угол выполняется в плоскости, параллельной *АА*, необходимо устанавливать лопатки в приспособлении так, как это показано на рис. 34. Однако из-за большой высоты *B* профиля, что является характерным для лопаток этого типа, условия работы фрезы при такой установке детали, были бы плохими. Кроме того, пришлось бы применять фрезы с большим диаметром.

Так, например, если $D_1 = 100$ мм, $B = 50$ мм, то $D_2 = 200$ мм. Как видно из соотношения диаметров D_1 и D_2, скорости резания у торцов фрезы будут различаться в 2 раза. Ввиду того что скорости резания приходилось бы назначать из условий обеспечения нормальной работы наибольшего диаметра фрезы, значительная часть профиля фрезы стала бы работать на пониженных скоростях. Чтобы можно было этого избежать, фрезерование наружного профиля у лопаток диафрагм под радиальным углом целесообразно производить не в рабочем поло-

жении, а в повернутом, как показано на схеме (рис. 35). Лопатка *1* устанавливается так, чтобы крайние точки профиля *а* и *б* находились на одной горизонтальной прямой. Условия работы фрезы при таком положении лопатки оказываются более благоприятными, так как разница в режимах резания для всех точек режущей кромки фрезы резко уменьшается.

При фрезеровании лопатки в повернутом состоянии настройку приспособления под радиальным углом надо осуществлять в плоскости *АА* (см. рис. 34). Для этого стол *4* приспособления (см. рис. 35) выполняется наклонным и снабжается плитой *3*, которая может быть повернута в плоскости *АА* относительно оси цапфы *6*. Ось цапфы помещена в вершине радиального угла, т. е. соответствует положению центра диафрагмы. Фиксирующая подушка *2* обеспечивает точную координацию лопатки. После настроечного поворота плиты *3* ее закрепляют на столе *4* болтами *5*.

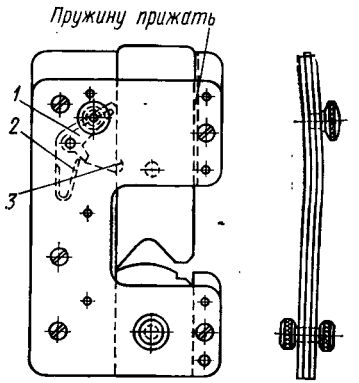


Рис. 36. Рамочный шаблон для контроля профилей лопаток

Проверка радиального угла производится шаблонами, аналогичными изображенному на рис. 31, с ориентировкой шаблонов по боковой плоскости лопатки со стороны паровхода. Измерительная грань шаблона — сторона с риской — располагается со стороны наружного профиля. Для правильной ориентировки по плоскости паровхода шаблон снабжается упором в виде приклепанной к нему накладной пластины. Для удобства наблюдения за правильностью конуса в упорной пластине напротив наклонной грани шаблона (стороны с риской) делается щель. С целью повышения точности измерения целесообразно применение синусной линейки с индикатором по схеме, аналогичной рис. 32.

Для проверки взаиморасположения внутреннего и наружного профилей применяются раздвижные профильные шаблоны в рамках (рис. 36). Шаблон состоит из рамки и вставок наружного и внутреннего профиля. Вставка внутреннего профиля закрепляется в рамке неподвижно. Вставка наружного профиля — подвижная. Для удобства пользования шаблоном рычажок *1* с помощью кулачка с накатанной головкой может быть введен в выемку *3* вставки наружного профиля. Тогда рычажок под действием плоской пружины *2* постоянно будет отводить вставку наружного профиля в верхнее крайнее положение.

Фрезерование профиля хвоста является одной из наиболее ответственных операций обработки лопаток. Правильное изготовление профиля хвоста лопатки обеспечивает надежное креп-

ление лопаток в пазах дисков и точную аксиальную и радиальную установку их на рабочем колесе. Здесь особенно важно подчеркнуть, что профили хвостов должны быть выполнены в строгом соответствии с допусками, указанными на чертеже. Такие же требования предъявляются к пазам, сделанным в дисках. Тщательное соблюдение этих требований должно обеспечивать правильную посадку лопаток в пазах дисков, а также взаимозаменяемость лопаток и дисков по посадочным местам, что является необходимым условием для производства и использования запасных частей при ремонте турбин.

Самым распространенным способом обработки Т-образных и им подобных хвостовых профилей лопаток является фрезерование на двухшпиндельных станках или на одношпиндельных станках с двухшпиндельными фрезерными головками. При такой обработке применяется комплект режущего инструмента из двух фрез, правой и левой. Диаметры фрез желательно выбирать возможно меньшими, что обеспечивает наиболее производительную работу. Профили фрез должны быть выполнены только по шаблонам и согласованы между собой.

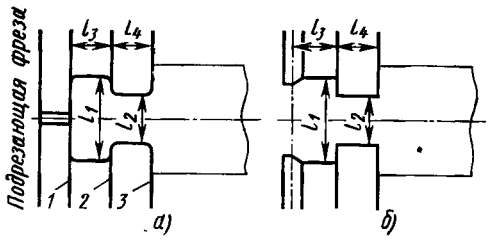


Рис. 37. Профили комплектов фрез для Т-образных хвостов:
а — с подрезанием торцов; *б* — без подрезания торцов

При фрезеровании Т-образных пазов с параллельными сторонами (рис. 37) боковые стороны *1*, *2* и *3* фрезы работают ненормально из-за возникновения трения, что приводит к быстрому износу фрез, получению недостаточно чистой поверхности и невозможности обеспечения установленных для размеров обрабатываемых деталей допусков. Избежать этого можно, если у фрезы на поверхностях *1*, *2* и *3* сделать боковой задний угол, благодаря чему качество обработки пазов повысится. Однако боковой задний угол сокращает срок службы фрезы. Для того чтобы удлинить этот срок, фрезы делают составными.

Комплект измерительного инструмента для контроля элементов хвоста показан на рис. 38. Калибр *1* представляет собой эталон паза диска. Он должен быть закален и доведен до проходных размеров паза. Угольник *4* служит для проверки отклонения от аксиального положения лопаток. Сухарь *2* представляет собой шаблон с наружным профилем лопатки и приклепанной к нему снизу пластинкой, точно пригнанной по пазу калибра. Пластинка приклепана таким образом, чтобы обеспечить сухарю определенное положение на калибре. При помощи сухаря контролируется правильное положение профиля лопатки и

смещение хвоста от оси. Линейка *3* служит для контроля радиального положения лопаток.

Правильно изготовленный хвост лопатки должен заходить в калибр от легких ударов молотка, наносимых через медную выколотку, защищающую поверхность хвоста лопатки от вмятин. Между посадочными размерами не допускается односторонних просветов, которые указывают на наличие перекосов.

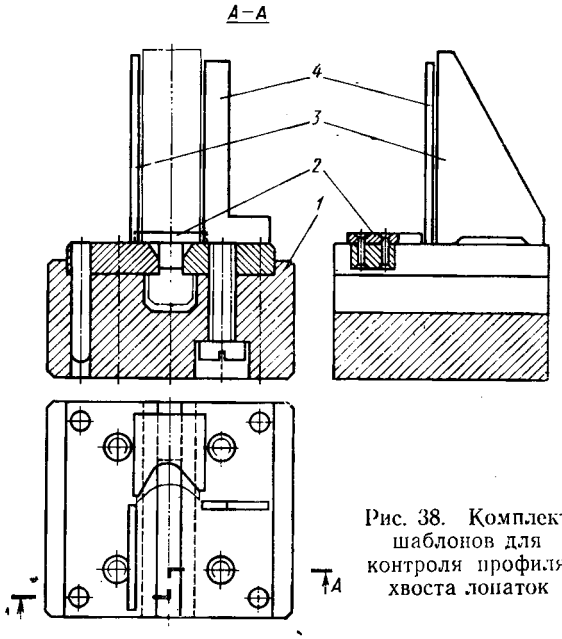


Рис. 38. Комплект шаблонов для контроля профиля хвоста лопаток

Перед установкой фрез необходимо проверить их размеры l_3 и l_4 (см. рис. 37). Размеры l_1 и l_2 устанавливают сближением центров шпинделей станка или двухшпиндельной головки, при этом следят, чтобы хвост лопатки был профрезерован по центру ее профиля. Размер l_3 (см. рис. 37, *б*) обеспечивается путем передвигания стола станка с установленным на нем приспособлением. Размер l_3 (см. рис. 37, *а*) получается путем перемещения на оправке подрезающих фрез, необходимое положение которых определяется прокладками. Размер l_4 зависит от размеров и установки фрезы. В случае, если размер l_4 получится больше чертежного, фрезы подшлифовывают для доведения этого размера до требуемого. Если размер l_4 получается меньше требуемого по чертежу, фреза заменяется как неправильно изготовленная. Наиболее рациональным является применение составной фрезы, допускающей регулировку размера l_4. Этой фрезой можно производить и подрезку торца лопатки; при этом эле-

менты хвоста могут быть отработаны с весьма высокой точностью

Фрезерование хвостов может производиться пакетами или по одной штуке. Для фрезерования хвостов пакетами применяют приспособление с рамками. На столе станка располагают два угольника, имеющие пазы для установки съемных рамок. К приспособлению придается комплект из двух рамок. В рамку набираются заготовки для лопаток и заготовки для промежуточных тел до полного ее заполнения. При работе на горизонтально-фрезерном станке рамка занимает вертикальное положение.

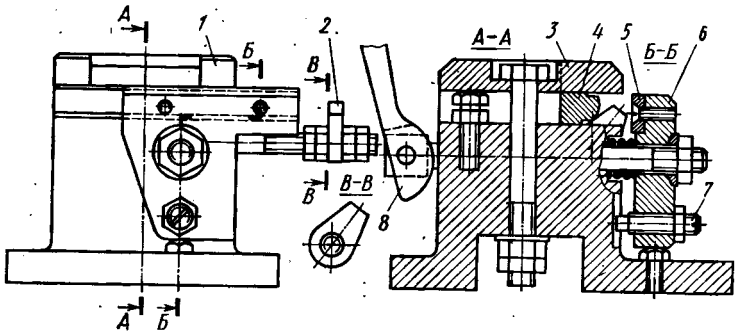


Рис. 39. Универсальное приспособление для обработки хвостов лопаток с шириной профиля от 10 до 50 мм:

1 — корпус; *2* — планка упорная; *3* — планка для прижима сменной подушки; *4* — сменная подушка; *5* — пластина каленая; *6* — планка прижимная; *7* — винт установочный; *8* — эксцентрик

Фрезерование хвостов по одной штуке применяется при обработке лопаток с утолщенным хвостом, имеющим радиальный угол, так как в этом случае обработку пакетами осуществить невозможно. Универсальное приспособление для фрезерования хвостов по одной штуке показано на рис. 39. Сменная подушка *4* приспособления изготовляется в соответствии с шириной и профилем обрабатываемых лопаток. Горизонтальное положение планки при изменении ширины подушки регулируется при помощи установочных винтов.

У лопаток, имеющих большую толщину хвоста (при больших шагах) или хвосты с заплечиками, для обработки профилей хвоста применяется точение на карусельных станках. Карусельные станки, выделяемые для этой работы, должны быть в хорошем состоянии и регулярно проверяться на технологическую точность. Нежелательно загружать эти станки другой работой и особенно тяжелой.

Высокая точность и чистота поверхности обеспечиваются обработкой профилей хвостов протяжками на протяжных прямолинейных или круговых станках. Производительность протяги-

вания в несколько раз выше фрезерования или точения. Однако протягивание целесообразно применять только при крупных сериях выпускаемых лопаток, что объясняется высокой стоимостью инструмента. Широкому внедрению протягивания хвостов в единичное и мелкосерийное производство паровых турбин будут содействовать унификация профилей хвостов и применение одного профиля хвоста для лопаток разных типоразмеров.

Грибовидные хвосты лопаток фрезеруют или протягивают. Порядок операций при фрезеровании и протягивании

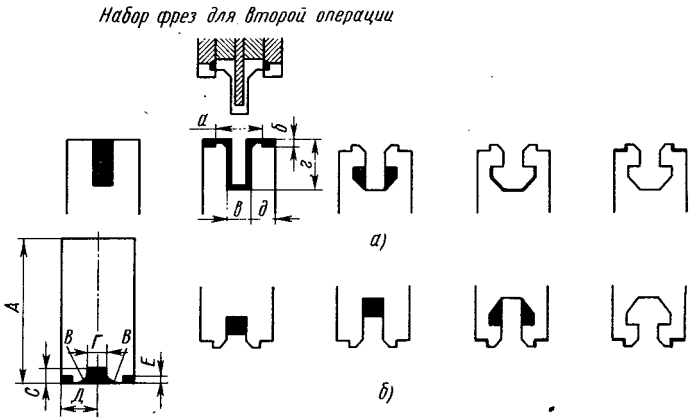


Рис. 40. Порядок операций обработки грибовидного хвоста лопатки:
а — фрезерованием; *б* — протягиванием

показан на рис. 40. Современные достижения в области протягивания должны вытеснять фрезерование для такого рода работ.

Фрезерование грибовидных хвостов — довольно сложная технологическая операция. Особой тщательности требует подготовка и выверка набора фрез для второй операции (рис. 40, *а*). Набор состоит из пяти фрез. Расстояние между фрезами устанавливается шайбами. По размерам *а* и *б* у грибовидных хвостов оставляется припуск от 0,3 до 0,5 мм для окончательной пригонки по диску. Чтобы установить указанные размеры, пользуются шайбами толщиной от 0,05 до 0,5 мм. Наибольшая точность требуется при установке средней фрезы, которая хотя и выполняется по размеру, но иногда расширяет паз, если неточно установлена или неправильно зажата. Правильность набора фрез проверяют по предварительно фрезеруемой заготовке. Для фрезерования пазов лопатки устанавливаются в приспособлении пакетом, что экономит время врезания фрезы.

Следующая операция — предварительное фрезерование опорных поверхностей хвоста лопатки. При выполнении этой

операции оставляют малые припуски на чистовой проход, что, в свою очередь, уменьшает износ чистовых фрез. Грибовидные фрезы (рис. 41) сложны в изготовлении. Поэтому при черновом проходе используют чистовые фрезы, уже потерявшие свой размер. На чистовой проход оставляют припуски до 0,5 мм.

Протягивание грибовидных хвостов производится за несколько операций, количество которых зависит от величины и конфигурации обрабатываемого паза. Для лопаток, имеющих хвост с одной или двумя грибовидными прорезями, паз хвоста обрабатывается за две операции, а профиль грибка выполняется начерно и окончательно за один проход. Протяжка состоит из нескольких секций. Порядок переходов при протягивании одноопорного грибовидного хвоста показан на рис. 40, *б*. Протягивание грибовидных хвостов пока что широкого распространения не получило, что объясняется сложностью изготовления протяжек.

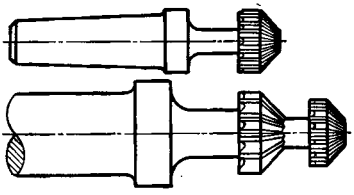


Рис. 41. Фрезы для обработки одно- и двухопорных грибовидных пазов

Вильчатые хвосты, как и все другие элементы хвостовых соединений, требуют большой точности при изготовлении. Особой аккуратности и тщательности требует обработка хвостов с несколькими пазами. По характеру соединения с дисками вильчатые хвосты могут быть разделены на наружные и внутренние, а по количеству пазов — на одновильчатые, двухвильчатые, трехвильчатые и многовильчатые.

Требуемую точность и чистоту поверхности вильчатых хвостов получают за две операции: 1) предварительная прорезка пазов с припуском на чистовую обработку и 2) чистовая обработка согласно размерам чертежа.

В отдельных случаях при малой ширине и глубине паза у однопазовых хвостов их обработка может производиться за один проход.

Пазы вильчатого хвоста лопатки предварительно фрезеруют с припуском по ширине паза от 0,3 до 0,6 мм, т. е. от 0,15 до 0,3 мм на сторону, набором дисковых профильных фрез. Глубина пазов при предварительном фрезеровании выдерживается в соответствии с окончательными размерами по чертежу. Шлифование производится на шлифовальных станках, типа заточных, мелким чашечным кругом.

Чтобы обеспечить требуемую точность расположения пазов и равномерное распределение припусков на шлифование, пользуются специальными наборами фрез, которые не разбираются до полного износа. Фрезы для набора изготовляются с припусками по ширине профиля и по диаметру и шлифуются после составления набора. При этом выдерживается требуемое рассто-

яние между фрезами и их ширина. Для нормальной работы фрез по боковым сторонам профиля дается небольшой задний угол от 0,5 до 1°. Затем производится затылование фрез по профилю и выдерживается наружный диаметр фрез. Таким же способом затачивают набор после его затупления, чем увеличивают срок службы набора, не нарушая его размеров.

Обработку вильчатых пазов можно производить и без использования профильных фрез. При таком способе (рис. 42) первоначально сверлят отверстия, определяющие дно обрабатываемых пазов, затем дисковыми трехсторонними фрезами (обычно нормальными) прорезают стенки пазов. Отверстия сверлят по кондуктору и затем развертывают. Диаметры отверстий равны ширине пазов +0,2 мм. Однако более целесообразно увеличить диаметр этих отверстий на 0,5 мм, что следует особо предусмотреть в чертеже. Недостатком этого способа является наличие дополнительных операций «сверление и развертывание отверстий», которые весьма трудоемки, так как должны выполняться с большой тщательностью.

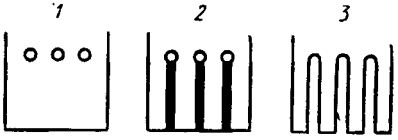


Рис. 42. Схема обработки вильчатых хвостов со сверлением отверстий у дна паза:

1 — сверление и развертывание отверстий; *2* — предварительное прорезание; *3* — чистовая обработка

Чистовая обработка вильчатых хвостов лопаток является более сложной, особенно при нескольких пазах, вследствие наличия отдельных элементов хвоста (выступ, паз и др.), изготовляемых с весьма высокой точностью. За базу для установки обрабатываемых лопаток в приспособление принимается боковая сторона, от которой задается размер *A* до «базы профиля» (рис. 43). База профиля (поверхность *3*) шлифуется первой. При работе двусторонним чашечным шлифовальным кругом последовательность шлифования остальных поверхностей устанавливается самим исполнителем. При работе односторонним чашечным шлифовальным кругом может быть рекомендована, как наиболее рациональная, следующая последовательность обработки: первой шлифуется поверхность *3*, т. е. база профиля; затем шлифовальный круг переустанавливается и шлифуются поверхности *2*, *4* и *6*; после этого снова переустанавливается круг и шлифуются поверхности *1* и *5*. Целесообразно эту работу выполнять с пооперационной настройкой инструмента.

При предварительной обработке пазов набором профильных фрез не образуется выход для круга, и при шлифовании приходится следить за тем, чтобы не было подрезания радиуса у дна пазов. Обработка дна паза сверлением в данном случае более целесообразна, так как при наличии отверстия у дна паза обеспечивается выход для шлифовального круга.

Чистовая обработка вильчатого хвоста производится на вертикально-фрезерном станке профильными дисковыми фрезами. Метод шлифования пазов, указанный выше, является весьма трудоемким и не всегда дает безупречное качество. С целью механизации этого процесса станкостроительная промышленность по заказу турбинных заводов изготовляет полуавтоматы для шлифования вильчатых хвостов. Однако внедрение полуавтоматического шлифования требует изменения системы координации сопрягаемых плоскостей вильчатого хвоста. Координация размеров, показанная на рис. 43, не соответствует требова-

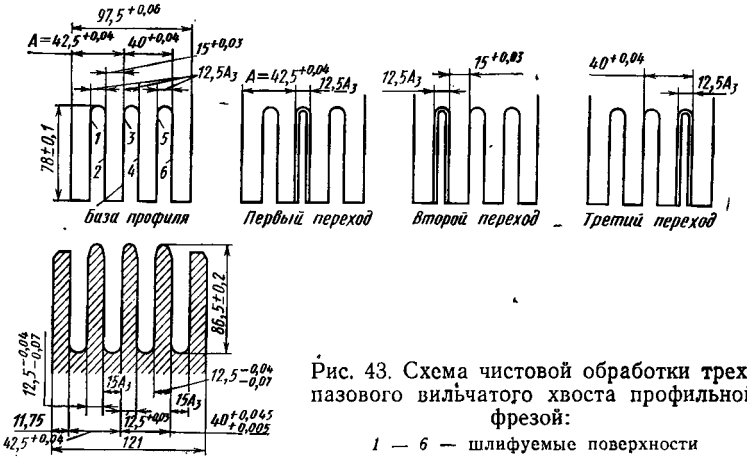


Рис. 43. Схема чистовой обработки трехпазового вильчатого хвоста профильной фрезой:

1 — 6 — шлифуемые поверхности

ниям полуавтоматической обработки. Для возможности использования такого метода шлифования требуется, чтобы координация сопрягаемых поверхностей была выполнена от одной из боковых сторон хвоста лопатки. Один из целесообразных для такой обработки вариантов системы координации показан на рис. 25.

Вильчатые хвосты удобны для протягивания, которое значительно упрощает процесс обработки лопаток. После грубой прорезки пазов на фрезерном станке окончательные размеры хвоста доводятся путем протягивания. Такой процесс используется в лопаточном производстве на ЛМЗ, однако только в качестве финишной операции после чистового фрезерования взамен шлифования. На ТМЗ был опробован метод протягивания вильчатых пазов в сплошном материале без предварительного фрезерования. Опытные работы дали весьма положительные результаты по размерам пазов, однако при этом не удалось получить требуемого класса чистоты поверхностей (вместо 6-го получен 5-й).

Елочные хвосты обрабатывают точением на токарных станках. Чтобы обеспечить в сопряжении допуск зазора

±0,03 мм (см. рис. 100, *б*) в условиях прерывистой токарной обработки с ударами, приспособление выполняют особо жестким и устойчивым против вибрации. Профильный резец, выполненный в виде скобы, необходим для обработки выпуклой и вогнутой сторон профиля без изменения положения резца. Изготовляют резцы по допускам для калибров лекальным способом.

Обработка рабочих частей лопаток. Рабочие профильные части лопаток в зависимости от формы хвостов и головок имеют различные конструкции, каждой из которых свойственна определенная технология механической обработки. В соответствии с этим (см. табл. 4) рабочие части лопаток паровых и газовых турбин можно подразделить на четыре вида: открытые, полуоткрытые, полузакрытые, и полностью закрытые.

Профили лопаток можно разделить на две группы: постоянного и переменного сечения. С точки зрения технологии формообразования профилей переменного сечения, их можно подразделить на линейчатые и нелинейчатые. Определение принятой терминологии дано в примечаниях к табл. 3 и 4. Рабочие части открытых лопаток постоянного сечения могут быть изготовлены холодной прокаткой из светлокатаного профиля или фрезерованием по схемам, показанным в табл. 5 и 6. При изготовлении таких лопаток фрезерованием из проката, заготовки первоначально делают достаточно длинными для возможности изготовления нескольких лопаток из одной заготовки. Однако общая длина заготовки не должна превышать 300—350 мм, что необходимо для удобства выполнения первых операций, связанных с образованием профильных поверхностей.

При фрезеровании длинных и тонких пластин, а также профильных заготовок, возникают затруднения, связанные с креплением их в приспособлениях. При обычном креплении в торец тонкая заготовка выпучивается, вследствие чего толщина заготовки при фрезеровании получается неравномерной. Кроме того, тонкая заготовка при обработке может вырваться из приспособления.

Во избежание указанных явлений, при обработке тонких пластин применяется приспособление (рис. 44), состоящее из двух частей, которые непосредственно не связаны друг с другом. Первая часть, корпус приспособления (поз. *17*), закрепляется на столе станка и служит для фиксирования обрабатываемой заготовки *16*, которая укладывается в корпус приспособления свободно без крепления и доводится рукой до специального упора. Вторая часть приспособления крепится на хоботе *6* фрезерного станка и служит для прижима обрабатываемой заготовки к корпусу приспособления. Эта часть состоит из плиты *3* с приваренной накладкой *5*, в которой обработан паз для соединения с хоботом станка. Прочное соединение осуществляется при помощи клина *7* и болтов *8*. С нижней стороны плиты при-

варены четыре планки *11*, между которыми помещаются рычаги *12* и *14*, свободно качающиеся вокруг осей *10*.

Обрабатываемая заготовка подводится столом станка к фрезе *13* и при помощи винта *4* прижимается рычагом *14* к корпусу приспособления. Затем включается подача, и начинается процесс фрезерования заготовки. Когда часть заготовки оказывается профрезерованной, винтом *9* подводится рычаг *12*, которым деталь прижимается к корпусу приспособления до окончания фрезерования. Пружины *1*, удерживаемые винтом *2* от выпадания, служат для отжимания рычагов от обрабатываемой заготовки при освобождении винтов *4* и *9*. Концы рычагов

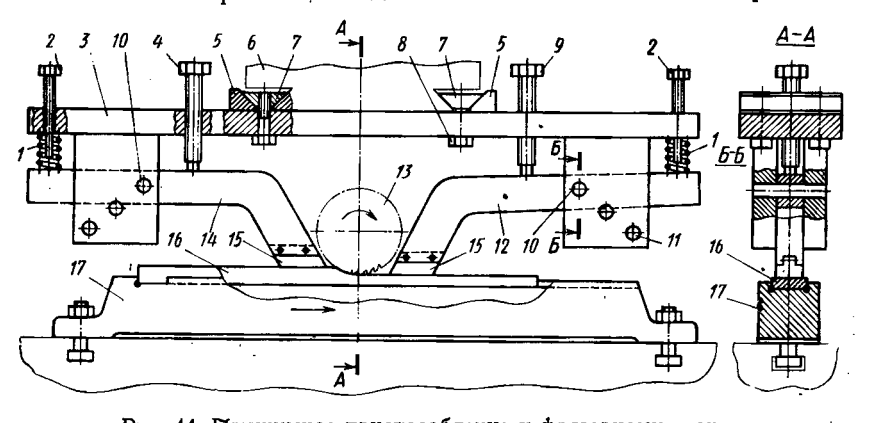


Рис. 44. Прижимное приспособление к фрезерному станку

12 и *14* снабжены наконечниками *15*, изготовленными из красной меди, что предупреждает образование задиров и царапин на поверхности заготовки при скольжении по ней рычагов. Дополнительные отверстия в планках *11* даны для перестановки рычагов в зависимости от диаметра фрезы. Плечи рычагов, обращенные к фрезе, значительно увеличены, чтобы создать условия для амортизации рычагов при неровностях и изменении толщины обрабатываемых заготовок.

При обработке заготовок из проката (см. табл. 5) припуск на пере лопатки может оказаться очень большим. Большие припуски необходимо снять до фрезерования заготовки профильными фрезами. Такой предварительный съем металла называется «облегчением» и выполняется нормальными фрезами, что содействует экономии дорогих профильных фрез и трудовых затрат, так как обработка нормальными фрезами более производительна. Припуск после облегчения оставляется от 0,5 до 1 мм.

Обработка рабочих частей открытых лопаток (см. табл. 5 и 6) может выполняться в универсальном приспособлении, показанном на рис. 45. Приспособление состоит из плиты *1*, на кото-

рой крепится барабан *2*. Барабан фиксируется от продольного перемещения планками *3* и закрепляется прижимами *4*. После отжатия барабан может быть повернут вокруг своей оси и закреплен в любом новом положении. Это обстоятельство делает приспособление универсальным.

Приспособление устанавливается на столе фрезерного станка, выверяется и закрепляется. На барабане фрезеруется профильная канавка (постель), поверхность которой должна точно соответствовать наружному профилю изготовляемой лопатки, что достигается путем фрезерования канавки фрезой, применяемой для фрезерования внутреннего профиля промежуточных

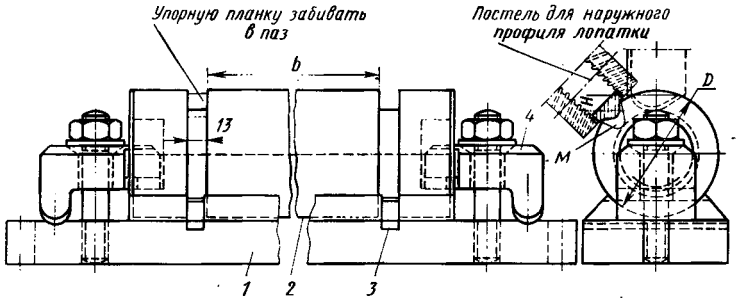


Рис. 45. Универсальное приспособление для обработки внутренних профилей лопаток постоянного сечения длиной до 450 мм

тел этой же лопатки. Таким образом, канавка на барабане будет точно соответствовать наружному профилю лопатки, а поскольку канавка профрезерована после установки приспособления на место, то никаких перекосов не должно быть. Глубина канавки делается возможно большей, чтобы создать опору для тонких кромок обрабатываемых лопаток и тем самым предупредить их отгибание при фрезеровании внутреннего профиля.

Конструкция приспособления позволяет произвести быструю и точную его установку. После того как канавка на барабане профрезерована, в кольцевой паз напротив фрезеруемой лопатки забивается упорная планка. Крепление лопатки в приспособлении для обработки достигается при помощи универсального прижимного приспособления, описанного выше.

Приспособление в положении, изображенном на рис. 45, подготовлено для фрезерования внутреннего профиля реактивной лопатки. Для рассматриваемого нами случая место в барабане обозначено буквой *M*. Процесс перестройки приспособления с одной работы на другую осуществляется путем поворота барабана на некоторый угол и фрезерования на его поверхности новой канавки, соответствующей профилю той лопатки, для обработки которой делается перестройка приспособления. Барабан приспособления должен быть сменным, что обеспечивает

быструю переналадку приспособления для обработки различных лопаток.

Фрезерование боков и внутреннего профиля лопатки выполняется с одной настройкой приспособления. На рис. 45 (положение *М*) черным показан слой металла, снимаемый при фрезеровании боков, а слой металла, снимаемый при фрезеровании внутреннего профиля, заштрихован. Бока и внутренний профиль лопатки могут быть обработаны комплектом фрез с одной установки. Однако на практике при изготовлении небольшого количества лопаток нередко оказывается более целесообразным разделить работу на две операции, чтобы не делать специальных комплектов фрез. Толщину профиля, толщину кромок и взаиморасположение внутреннего и наружного профилей проверяют по профильному рамочному шаблону (см. рис. 36) и предельными скобами.

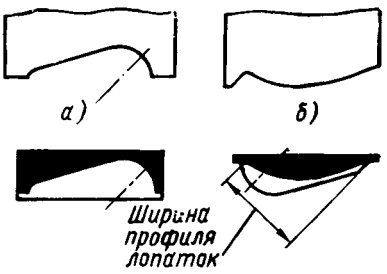


Рис. 46. Профили фрез для обработки реактивных профилей:
а — наружных; *б* — внутренних

Фрезерованием внутреннего профиля должен быть предусмотрен припуск 0,15—0,3 мм на дальнейшую обработку профиля путем шлифования и полирования. При таком припуске на максимальной толщине профиля лопатки величина припусков на кромках находится в пределах 0,05—0,1 мм и зависит от угла профиля.

Форма реактивного профиля лопатки дает возможность одновременно фрезеровать профиль и бока заготовки одной фрезой соответствующего профиля, не прибегая к набору комплекта фрез. Профили таких фрез показаны на рис. 46.

Рабочие части лопаток переменного сечения имеют бока, выполненные с наклоном, образующим сужение рабочей части по направлению к головке. Фрезерование боков лопатки по уклону может выполняться на горизонтальных или вертикально-фрезерных станках. Наиболее пригодными для этой работы являются двухшпиндельные вертикально-фрезерные станки, допускающие перемещение одного из шпинделей по наклонной линейке (копиру).

Контроль правильности фрезерования боков лопаток по уклону осуществляется в специальном контрольном приспособлении с индикаторами. Базирование лопаток в приспособлении осуществляется по посадочному профилю хвоста.

Косое фрезерование профилей переменного сечения является наиболее распространенным процессом при обработке сравнительно коротких лопаток. Схема косого фрезерования лопатки переменного профиля показана на рис. 47. Радиусы

r_1 и r_2, которыми очерчены внутренняя и наружная поверхности сечений (рис. 47, *б*), не меняются по высоте лопатки. Центры этих радиусов лежат на прямых *AB* (для наружного профиля) и *CD* (для внутреннего профиля), наклоненных по отношению к осевой (радиальной) линии *YY* лопатки. По направлению *BA* лопатка должна перемещаться при фрезеровании наружного профиля, по направлению *DC* — при фрезеровании внутреннего профиля. Линии центров наклонены также и к базовой плоскости лопатки, проведенной через выходную кромку в сечении у

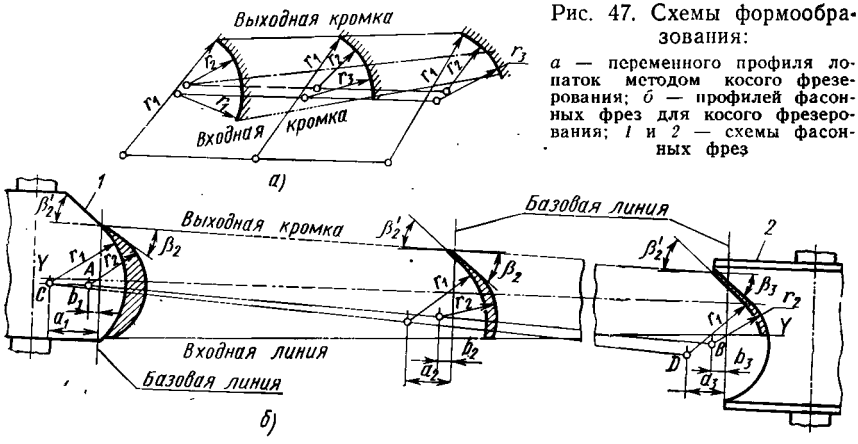


Рис. 47. Схемы формообразования:

а — переменного профиля лопаток методом косого фрезерования; *б* — профилей фасонных фрез для косого фрезерования; *1* и *2* — схемы фасонных фрез

хвоста лопатки. В поперечных сечениях эта плоскость изображена линиями. Наклон линий центров к базовой плоскости измеряется отрезками a_1, a_2, a_3 для внутренней поверхности и b_1, b_2, b_3 — для наружной.

Для фрезерования обрабатываемая лопатка должна быть установлена с соответствующим наклоном к столу станка. Наклон лопатки рассчитывается так, чтобы линии центров *AB* и *CD* были параллельны столу станка. На рис. 47, *б* показано и формообразование профиля фрезы. Последний образуется путем совмещения и соответствующего координирования профилей крайних сечений.

Если профиль лопатки очерчивается несколькими радиусами, как это схематично показано на рис. 47, *а*, то для возможности осуществления косого фрезерования профильной фрезой необходимо, чтобы линии центров одной и той же поверхности были параллельны друг другу. Если это условие не соблюдено, косое фрезерование невозможно.

При чистовом профильном фрезеровании широких профилей возникают затруднения, связанные с большой шириной профиля и вследствие этого с малым количеством зубьев фрезы.

Такие фрезы работают плохо, с ударами; нагрузка на зуб — большая. В результате, фрезы, как говорят, «рубят».

На рис. 48 показана составная профильная фреза. Каждая из фрез набора имеет по два шпоночных паза: один для сборки на оправку при изготовлении и затыловании зубьев; второй, — смещенный относительно положения паза на другой фрезе на угол $\frac{\alpha}{n}$ (α — угол между зубьями одной фрезы, n — число фрез набора). Таким образом, зубья фрез при сборке их на шпонки смещаются один относительно другого на угол $\frac{\alpha}{n}$. Работа фрезы при этом совершается более плавно. Заточку фрез надо вести затылованием, что удлиняет срок их службы.

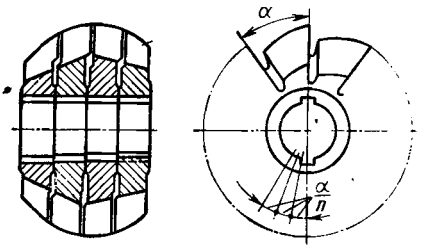


Рис. 48. Высокопроизводительная затылованная профильная фреза

Для обработки крупных лопаток с широкими профилями заводы стали применять профильные фрезы с остроконечными зубьями. Одним из весьма существенных преимуществ таких фрез является возможность изготовления их спиральными. Высота остроконечных зубьев, как известно, значительно меньше затылованных. В силу этого количество зубьев у фрезы с остроконечными зубьями может быть значительно большим, чем у затылованной, при одном и том же диаметре фрезы. При наличии к тому же спиральной формы зуба такие фрезы работают легче, чистота обработки получается более высокой.

Для производства и заточки профильных фрез с остроконечными зубьями требуется специализация заточных станков путем модернизации или изготовление специальных станков и приспособлений.

Проверка профиля лопатки после фрезерования производится относительно боков лопатки при помощи шаблонов (рис. 49). Кроме формы профиля должно быть проверено его положение по отношению к плоскости хвоста лопатки. Этой проверкой устанавливается правильность положения рабочей части по отношению к линии центра тяжести и средней линии.

Наиболее употребительные схемы измерения показаны на рис. 50, *а* для лопаток с линейчатыми профилями и на рис. 50, *б* — с нелинейчатыми. В первом случае измерение ведут в двух крайних сечениях, во-втором — обязательно в каждом контрольном сечении в приспособлении для проверки профилей с помощью глубиномера. Отклонение от заданного размера определяют по зазору *а* предельной пластиной или щупом.

Спиральное фрезерование переменного профиля. В тех случаях, когда переменный профиль лопатки может быть обработан профильной фрезой, но только путем поворота лопатки во время фрезерования, обработка производится на вращающемся приспособлении (рис. 51). Приспособление состоит

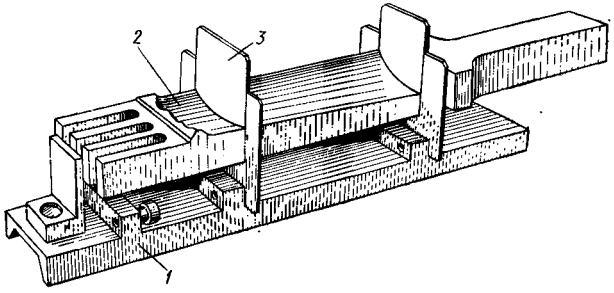


Рис. 49. Проверка профиля лопаток переменного сечения:

1 — корпус контрольного приспособления; *2* — проверяемая лопатка; *3* — шаблон профиля лопатки

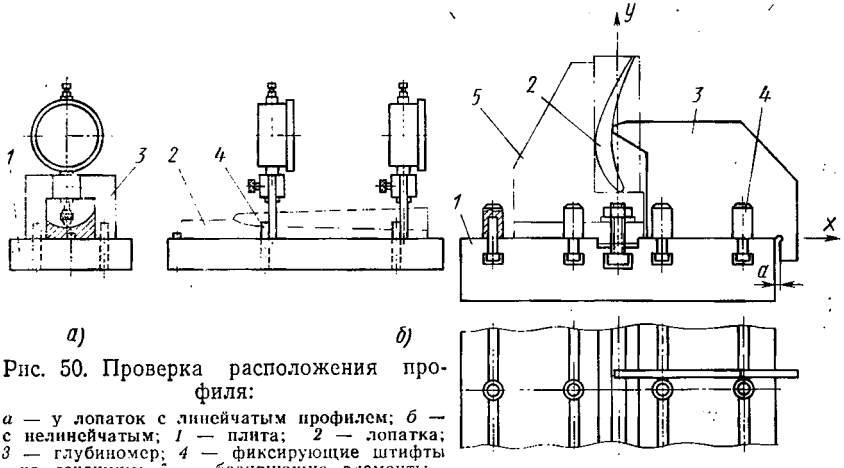


Рис. 50. Проверка расположения профиля:

а — у лопаток с линейчатым профилем; *б* — с нелинейчатым; *1* — плита; *2* — лопатка; *3* — глубиномер; *4* — фиксирующие штифты по сечениям; *5* — базирующие элементы

из корпуса *1* с двумя подшипниками для свободного вращения, оправки *2*, на которой крепится лопатка. В нижней части оправки имеется палец с шаровым утолщением. Тяга *3* соединяет палец оправки с копиром *4*. При перемещении стола ролик *6* вместе с осью *5*, двигаясь по наклонному пазу копира, заставляет вращаться оправку. То же самое можно осуществить при помощи зубчатого сегмента и рейки.

Обработка профиля лопаток по спирали может быть выполнена при помощи универсальной делительной головки, однако

применение таких дорогих устройств в производстве лопаток как технически, так и экономически нецелесообразно, так как объем этих работ в лопаточном производстве весьма мал.

Обработка профилей лопаток сверлением применяется для коротких лопаток постоянного профиля длиной до 120—150 мм (см. опер. 11, табл. 8) и может осуществляться на сверлильных, револьверных и вертикально-фрезерных станках. Наиболее целесообразно применение револьверных станков. Этот процесс имеет значительные преимущества перед фрезерованием, так как позволяет: 1) применять стандартные

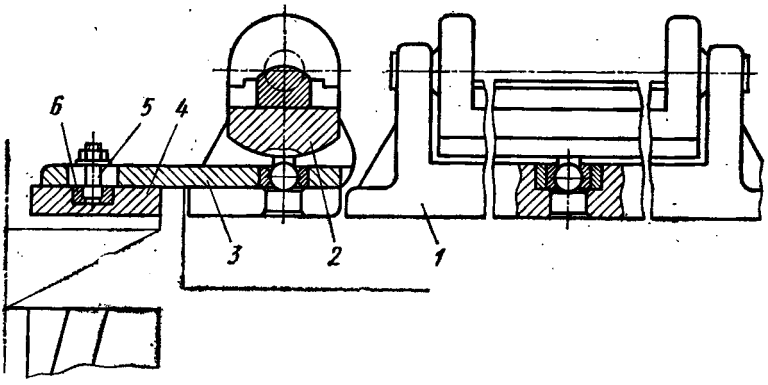


Рис. 51. Схема приспособления для спирального профилеобразования

режущие инструменты вместо дорогих профильных фрез; 2) увеличить производительность труда (при сверлении обрабатываются одновременно две лопатки); 3) сократить цикл обработки, так как отпадают операции, связанные с обработкой внутренней галтели фрезерованием и шлифованием, которая не требуется после обработки развертками.

Чтобы полностью использовать преимущества операции, целесообразно предусматривать по ширине заготовки технологический припуск (см., например, припуск *А* на эскизе готовой лопатки в табл. 8) с таким расчетом, чтобы центр радиуса внутреннего профиля находился на оси симметрии заготовки. При этом создаются благоприятные условия как для обработки самих лопаток, так и для проектирования и изготовления установочных приспособлений.

При симметричном расположении боков заготовки относительно центра радиуса профиля (см. эскиз лопатки в табл. 8) приспособление, например, для револьверного станка можно выполнить в виде простого в изготовлении двухкулачкового патрона с независимыми кулачками, показанного на рис. 52. Припуск *А* целесообразно удалять после облопачивания одно-

временно с операцией точения уплотнительных усиков на припуске *Б*.

Фрезерование внутренних галтелей производится цилиндрическими фрезами в поперечном направлении и

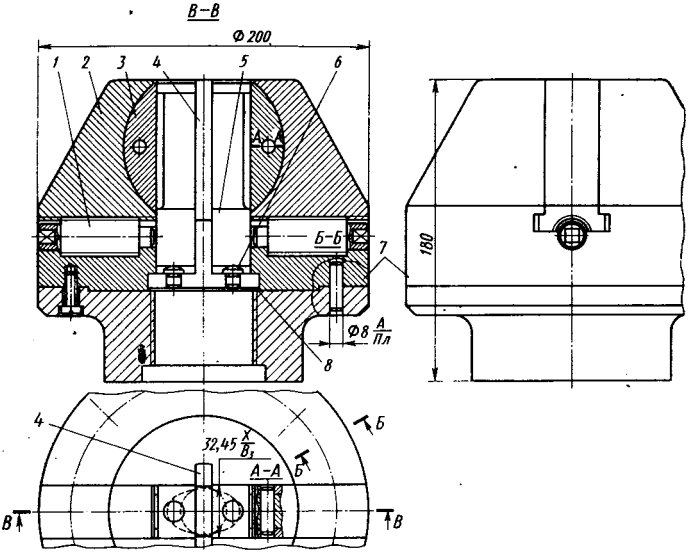


Рис. 52. Патрон для обработки профилей лопаток:

1 — винт кулачка; *2* — кулачок; *3* — коромысло; *4* — упор; *5* — лопатка; *6* — опора; *7* — корпус; *8* — компенсирующая прокладка

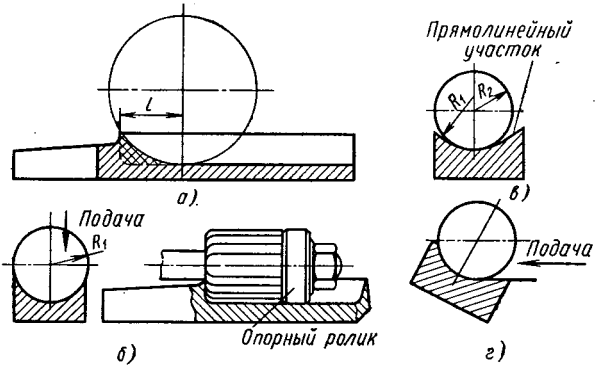


Рис. 53. Схема фрезерования внутренней галтели

является необходимой операцией после обработки внутренних профилей закрытых лопаток профильными фрезами. В этом случае на выходе фрезы у хвостовой части обрабатываемой лопатки (рис. 53, *а*) остается недофрезерованным участок, который тем больше, чем глубже профиль и чем больше радиус фрезы. По-

этому фрезы для обработки внутреннего профиля лопатки следует брать по возможности меньшего диаметра.

Операция выполняется цилиндрической фрезой, имеющей на торце соответствующий радиус. Длина фрезы должна быть больше величины *l*, указанной на рисунке. Когда внутренний профиль очерчен одним радиусом, направление подачи фрезы вертикальное (рис. 53, *б*). При наличии прямолинейного участка лопатка устанавливается, как показано на рис. 53, *г*. В случае, приведенном на рис. 53, *в*, остается увеличенный припуск, для снятия которого требуется дополнительная обработка в процессе шлифования профиля.

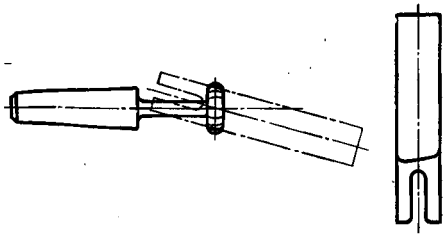


Рис. 54. Схема фрезерования внутренней галтели под углом

Вследствие сравнительно большой длины лопаток обработку галтелей производят со стороны хвоста. Поэтому приходится пользоваться фрезами с ограниченным по величине диаметром. Чтобы предупредить возможные при этом поломки оправок, их надо делать из особо прочных сталей, наиболее устойчивых против усталости, и, где возможно, устанавливать для них специальные поддержки (кронштейны). При особо малых диаметрах оправок необходимо изготовлять цельные фрезы вместе с хвостовиком и работать на малых подачах. Для предохранения от врезания фрезы в лопатку, рядом с фрезой устанавливают ролик, который должен свободно вращаться на оправке (рис. 53, *б*). Прикоснувшись к лопатке, ролик останавливается, что служит сигналом рабочего для прекращения подачи.

Фрезерование косых внутренних галтелей производится в две операции: фрезерование прямой галтели и фрезерование косой галтели. Прямая галтель выполняется описанным выше способом. Фрезерование косой галтели, т. е. галтели, расположенной под некоторым углом, производится на том же приспособлении, но повернутом на нужный угол (рис. 54). Фреза для фрезерования галтели под углом представляет собой цельную грибовидную фрезу с радиусным профилем. Бугры, остающиеся в местах перехода от прямой галтели к косой, выбираются шлифованием.

Фрезерование наружного профиля рабочих частей лопаток — сложная и ответственная операция, при выполнении которой должны быть выдержаны правильное взаиморасположение внутреннего и наружного профилей, заданная толщина профиля на кромках и в максимальном сечении, а также установленная длина хвостовой части лопатки.

Обработка наружного профиля у коротких лопаток постоянного сечения, изготовляемых из бруска, включает три операции: 1) облегчение выходной кромки; 2) облегчение входной кромки; 3) обработку спинки и кромок профиля обкаткой, выполняемой на вертикально-фрезерном станке. Приспособления для первых двух операций очень просты и их конструкция вполне понятна из схемы, приведенной на рис. 55. При наличии косой

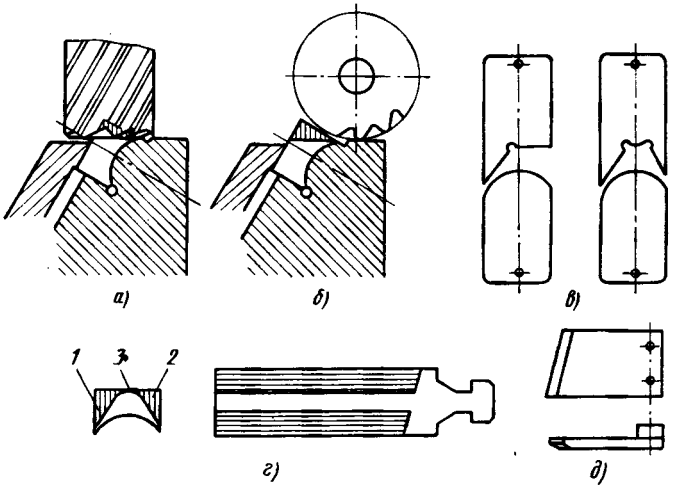


Рис. 55. Схема фрезерования углов наружного профиля и наружной косой галтели:

а — на вертикально-фрезерном станке; *б* — на горизонтально-фрезерном станке; *в* — комплект шаблонов для проверки при фрезеровании углов; *г* — вид лопатки после фрезерования углов; *д* — шаблон для проверки скосов; *1* — припуск на выходной кромке; *2* — припуск на входной кромке; *3* — припуск на спинке и кромках профиля для чистового прохода

галтели лопатка устанавливается под углом, и кромки у основания хвоста получаются косыми, а переход на радиус профиля доводится шлифованием.

Схема обкатки профиля, очерченного двумя прямолинейными участками и радиусом (для третьей операции), показана на рис. 56 [4]. Положение *I* соответствует началу работы. В этот момент включается продольная подача стола и фрезеруется первый прямолинейный участок *а*. В положении *II* продольная подача выключается, и начинается поворот лопатки вокруг центра радиуса профиля, который должен быть совмещен с центром поворотного приспособления. Момент начала поворота определяется по совпадению рисок, нанесенных на станине и на столе станка. В положении *III* обкатка цилиндрической поверхности закончена, и вновь включается продольная подача для фрезерования второго прямолинейного участка *б*. Полная обработка заканчивается в положении *IV*.

Приспособление состоит из основания с ограничителями поворота *1* и *2* и поворотного стола с рычагом. В положении *I* рычаг находится в пазу ограничителя *1*. Фрезерование цилиндрической части профиля заканчивается совпадением рычага с пазом ограничителя *2*. Ограничители могут устанавливаться на любой угол.

Наиболе целесообразно взамен обкатки на указанном приспособлении применять специальные копировально-фрезерные станки, например типов ОФ-8 или 6М42К, выпускаемые отечественными станкостроительными заводами. На них могут быть

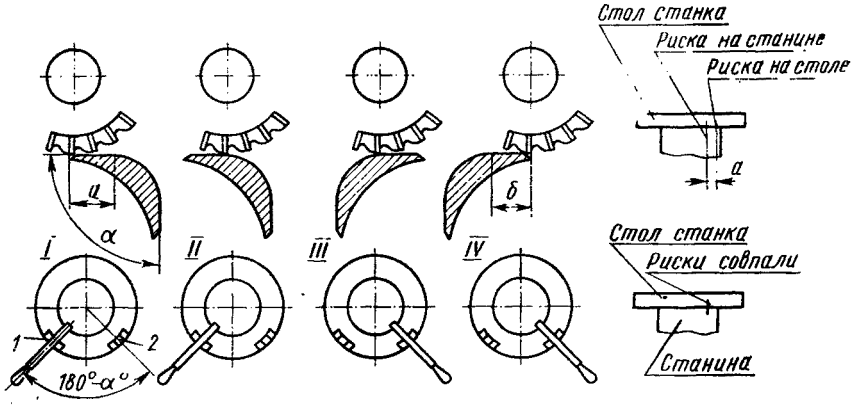


Рис. 56. Схема обкатки наружных профилей лопаток

обработаны профили любого очертания (однорадиусные и многорадиусные). Стол станка *2* (рис. 57) под действием гидросистемы в точности следует за копиром *3*, постоянно прижимающимся к ролику трейсера (щупа) *4*. Точность и чистота поверхности профиля при обработке на этих станках высокая. Наладка станка проста и состоит из установки зажимного приспособления *1* и шаблона копира *3*, помещаемого возле шпинделя трейсера. Приспособление может быть одноместным и многоместным. Приспособление, показанное на рис. 56, при наличии копировально-фрезерных станков целесообразно применять лишь для предварительной грубой обработки заготовок.

Обработка рабочих частей коротких лопаток длиной до 300 мм со сложно пространственным профилем производится несколькими способами фрезерования с применением объемных копиров (моделей) на полуавтоматических копировально-фрезерных станках, электрическими методами или прецизионной штамповкой с последующей безразмерной обработкой шлифованием. Характерными представителями подобных деталей являются лопатки газовых турбин и осевых компрессоров.

Среди известных способов копировально-фрезерной обработки наиболее хорошо зарекомендовали себя для такого типа ло-

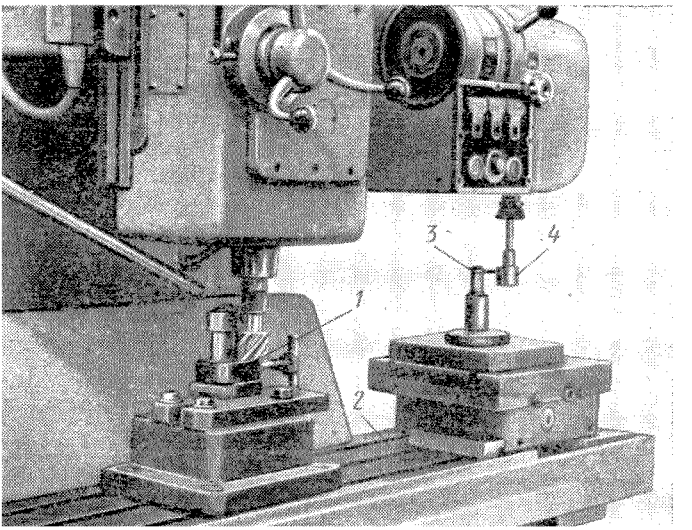


Рис. 57. Схема обработки наружных профилей лопаток на копировально-фрезерном станке 642К

паток следующие: а) фрезерование поперечными строчками цилиндрической фрезой на станках типа ОФ-31М; б) круговое фрезерование продольными и поперечными строчками.

Схема обработки на станке ОФ-31М показана на рис. 58. Копирование ведется автоматически по модели с масштабом 1 : 1. Метод построчного фрезерования цилиндрической фрезой базируется на том условии, что кривизна любого сечения обрабатываемой поверхности вдоль оси детали невелика, а продольные образующие профиля внутри каждой выбранной величины строки приближаются к прямой и образуют с горизонтом угол не более 18°. Наибольший суммарный угол на-

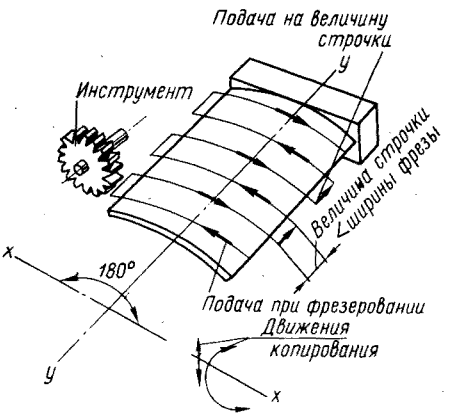


Рис. 58. Схема фрезерования лопаток по объемному копиру на станках ОФ-31 и ОФ-33

клона продольных образующих относительно друг друга не должен превышать 36°.

Обрабатываемая лопатка крепится в приспособлении, устанавливаемом поперек стола в направлении $Y - Y$. Фреза имеет только вращательное движение. Движения копирования — вертикальное и покачивание стола вокруг оси $X—X$ — осуществляются за счет перемещений стола при одновременном действии двух гидроцилиндров, получающих команды от двух копирных золотников. Подачи вдоль и поперек лопатки осуществляются также столом от отдельных гидроцилиндров.

Ширина фрезы выбирается в зависимости от кривизны профиля с таким расчетом, чтобы величина ступеньки между двумя параллельными строчками не превышала $^2/_3$ величины припуска на шлифование, т. е. приблизительно 0,1—0,15 мм. Увеличение угла закрутки резко снижает допустимую ширину строчки и увеличивает трудоемкость обработки лопаток. Работы технологов в области совершенствования обработки таких лопаток должны направляться на получение точных штамповок и точного литья с оставлением минимальных припусков на шлифование и полирование. Не исключена возможность обработки таких лопаток методом обтачивания и растачивания по копиру.

11. Электрофизические методы обработки лопаток

Внедрение электрофизических методов обработки лопаток тесно связано с применением жаропрочных сплавов трудно поддающихся или совсем не поддающихся обработке резанием. С повышением жаропрочности материалов резко ухудшается их обрабатываемость на металлорежущих станках. Особенно затруднительной, а в некоторых случаях просто невозможной, становится обработка рабочих частей лопаток, где требуется применение профильных фрез, которые, как известно, изготовляются из быстрорежущей стали, и их режущие возможности по этой причине для обработки жаропрочных материалов оказываются совершенно недостаточными.

Из электрофизических методов обработки в турбиностроении применяются электроэрозионные (электроискровой, электроимпульсный, анодно-механический) и электрохимические. Электроимпульсный метод является дальнейшим развитием электроискрового способа и отличается от последнего применением устройства для генерирования импульсов. Использование этого метода дает возможность резко увеличить съем металла в единицу времени.

Сущность электроискрового метода заключается в следующем: при проскакивании искры в воздушном промежутке (рис. 59, *а*) между инструментом (катодом) *1* и обрабатываемой деталью (анодом) *2* происходит нагрев той небольшой поверхности, на которую попадает искра, и металл оплавляется. Сам

процесс происходит как бы в виде небольших взрывов: металл, расплавленный искрой, в газообразном состоянии мгновенно расширяется и выбрасывается с поверхности анода на катод, оседает на нем и затвердевает в виде наростов. Если же процесс вести в какой-либо жидкости, не проводящей электрического тока (например, в керосине), то искра будет проскакивать в этом промежутке между катодом и анодом так же легко,

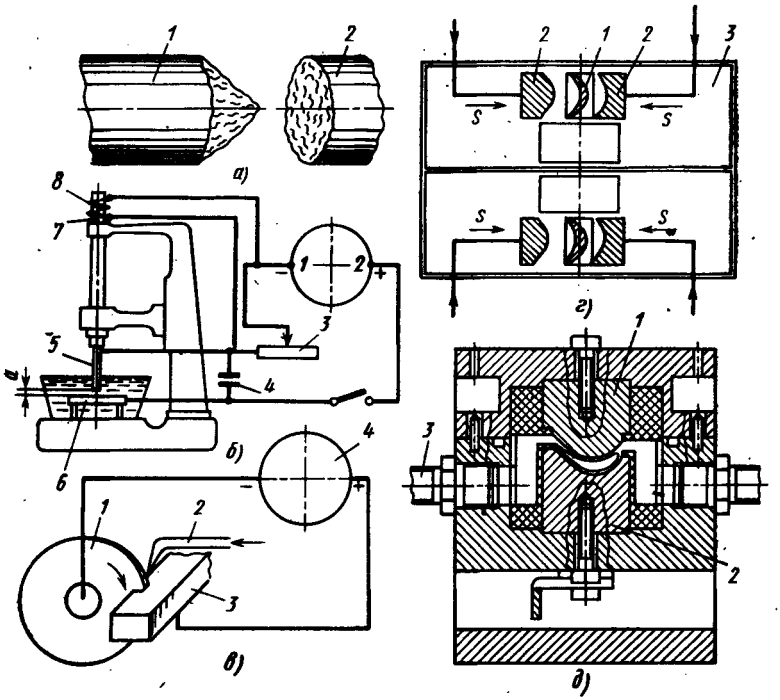


Рис. 59. Схемы электрофизических методов обработки, применяемых при обработке лопаток:

а и *б* — электроискровых; *в* — анодно-механического; *г* — электроимпульсного; *д* — электрохимического

как и через воздух, но образования наростов происходить не будет, так как брызги металла будут оседать в жидкости, а изделие в месте соприкосновения с инструментом примет его форму.

Схема электроискрового метода показана на рис. 59, *б*. Электрический ток от зажима *1* генератора постоянного тока подводится через сопротивление *3* к электроду-инструменту *5* и через зазор *а* проходит к обрабатываемой детали *6* и затем к зажиму *2*. В электрическую цепь включен конденсатор *4*, создающий импульсы, необходимые для образования искры. Соленоидный регулятор заставляет колебаться электрод *5*. При про-

скакивании искры ток также будет проходить через соленоид, намагничивать сердечник *8* и втягивать катушку *7*. Это вызовет подъем электрода, увеличение зазора *a* и разрыв электрической цепи. Подача тока в катушку соленоида прекратится, сердечник размагнитится, и шпиндель с электродом опустятся вниз. При достижении установленной величины зазора *a* опять произойдет проскакивание искры, и весь процесс повторится, в результате чего в обрабатываемой детали прошивается отверстие по форме электрода.

Сущность анодно-механического метода видна из схемы, изображенной на рис. 59, *в*. Электрод-инструмент *1*, изготовленный из листового железа в виде диска, вращается вокруг своей оси. В пространство между этим диском и разрезаемой деталью *3* по трубке *2* подается электролит — жидкое стекло. Электрод и заготовка детали присоединяются к генератору постоянного тока *4*. Под действием электрического тока электролит растворяет металл, образуя на поверхности заготовки в месте разрезания тонкую пленку металла пониженной прочности. При своем вращении диск *1* легко соскабливает эту пленку.

Наиболее перспективными в производстве лопаток оказались: электроимпульсная обработка, предназначаемая в основном для предварительной обработки, и электрохимическая — для окончательной обработки.

Электрофизические методы часто сочетают с механическими методами обработки; электрофизическими методами обрабатывают рабочие части лопаток, а механическим резанием — остальные элементы. Электрофизические методы, проверенные при изготовлении лопаток из жаропрочных сплавов, применяют в серийном производстве лопаток не только газовых турбин, но и паровых турбин, имеющих сложную форму, независимо от жаропрочности материала. Они уже успешно используются при обработке лопаток длиной до 350 мм и внедряются при обработке лопаток большей длины.

Сущность электроимпульсной обработки состоит в следующем: на обрабатываемую деталь *1* (рис. 59, *г*) и электроды *2*, помещенные в ванне *3* с диэлектриком, которым служит трансформаторное или веретенное масло, подается импульсное напряжение от специального генератора импульсов. В результате воздействия электрического тока и постепенного перемещения электродов в направлении *s* происходит съем металла с поверхности обрабатываемого изделия. При электроимпульсной обработке используются электрические импульсы напряжения примерно 25 В и длительностью около 0,001 с с частотой повторения 400 импульсов в секунду. Установка потребляет ток силой до 300 А и более, вырабатываемый специальными машинными генераторами.

Интенсивность съема металла зависит главным образом от силы тока. Чем больше сила тока, тем больше съем металла и

величина неровностей на обрабатываемой поверхности. С понижением электрических режимов чистота поверхности улучшается. Скорость съема металла достигает 1000 мм³/мин при точности в 0,2—0,3 мм и получаемой чистоте поверхности 3—4-го классов. Из-за термического характера процесса на обрабатываемой поверхности создается поврежденный слой, глубина которого достигает 0,2—0,5 мм. Этот слой снимается при дальнейшей механической обработки детали.

В качестве электрода-инструмента применяют алюминиевые или коксографитовые электроды. Наилучшими являются коксографитовые электроды. Износ инструмента составляет примерно 0,05—0,3% от объема снимаемого слоя металла.

Для электроимпульсной обработки в турбиностроении применяют одношпиндельные и однопозиционные станки моделей 473 и 4723 Троицкого станкостроительного завода и специальные станки МЭ-8. На станках моделей 473 и 4723 обрабатывают попеременно внутренний или наружный профиль лопаток. На станке МЭ-8 производится одновременная обработка внутреннего и наружного профилей лопаток непосредственно из заготовки-штамповки. Схема такой обработки показана на рис. 59, *г*. Здесь обрабатываются одновременно две лопатки на разных режимах. Так, в первой позиции лопатка обрабатывается на грубом режиме для снятия основной массы металла в короткий промежуток времени; на второй позиции профиль лопатки обрабатывается на мягком режиме, обеспечивающем заданную точность профиля и хорошее качество поверхности. Весь цикл обработки профиля рабочей части лопатки на грубом и мягком режимах не превышает 40 мин.

Финишная обработка производится электрохимическим методом. При этом электроимпульсной обработкой снимают припуск с заготовок до получения эквидистантного расположения его вокруг профиля лопаток, а электрохимической обработкой снимают остальной припуск. Целесообразно припуск под электрохимическую обработку оставлять 1,3—1,5 мм.

Размерная электрохимическая обработка осуществляется на специальных станках для электрохимической обработки. Промышленностью для указанных целей выпущена гамма станков ЭХО-1, ЭХО-2, АГЭ-2, АГЭ-3, основанных на схеме обработки подвижными электродами.

Процесс электрохимической обработки основан на анодном растворении металлов с прокачкой электролита и состоит в следующем. Обрабатываемая лопатка, являющаяся анодом, закрепляется в специальном приспособлении (рис. 59, *д*) между двумя объемными латунными (можно и из стали 1Х13) электродами *1* и *2*, выполненными по профилю лопатки. В данном процессе они являются катодами. Зазор между электродами и обрабатываемыми поверхностями составляет 0,2—0,3 мм. Через зазор циркулирует подаваемый по трубе *3* электролит с боль-

шой скоростью (10—12 м/с) под давлением 100—150 Н/см² (10—15 кгс/см²). В качестве электролита (токопроводящей жидкости), как правило, используется 10%-ный раствор поваренной соли.

Струя электролита, протекающая с большой скоростью в межэлектродном зазоре, при пропускании тока определенной плотности интенсивно растворяет поверхность анода (лопатки) и выносит продукты растворения; при этом профиль катода-инструмента копируется на заготовке.

Ввиду того что процесс электрохимической обработки происходит без непосредственного контакта электродов с лопаткой, инструмент практически не срабатывается. Производительность электрохимической обработки составляет 0,2—0,4 мм/мин с каждой стороны профиля лопатки. Чистота обработки соответствует 7—8-му классам при точности обработки размеров по профилю до 0,1 мм. Имеются примеры достижения и более высокой производительности и точности обработки, когда съем металла с лопатки доходит до 1 мм/мин при чистоте поверхности 6—7-го классов и точности размеров профиля по шаблону в пределах 0,05 мм.

Производительность электрохимической обработки не зависит от марок материала лопаток, а зависит только от электрических режимов.

Интенсивность съема определяется уравнением

$$Q = CIt,$$

где Q — количество снятого металла в г;

C — электрохимический эквивалент металла заготовки в г/А·мин;

I — сила тока в А;

t — время в мин.

Скорость съема при электрохимической обработке выражается следующей зависимостью:

$$S = \frac{C_v U \gamma}{h_0},$$

где C_v — объемный электрохимический эквивалент металла заготовки в мм³/А·мин;

U — напряжение на электродах в В;

γ — электропроводность промежутка в 1/Ом·см;

h_0 — расстояние между электродами.

В процессе электрохимической обработки термических явлений на обрабатываемой поверхности не происходит вследствие чего отсутствуют остаточные напряжения, а следовательно, исключается и деформация лопаток. Однако после электрохимической обработки на поверхности лопаток обнаруживается растравливание по границам зерен, поэтому рекомендуется после

нее проводить механическое полирование, оставляя для этого припуск около 0,05 мм.

В некоторых случаях, в результате недостаточно надежной защиты установочных (базовых) поверхностей лопатки от циркуляции электролита, происходит ненужное травление этих поверхностей, вызывающее необходимость вводить дополнительную механическую обработку. Этого можно избежать путем обеспечения полной защиты установочных поверхностей, применяя латунные вставки, покрытые снаружи резиной [13].

Станки для электроимпульсной и электрохимической обработки обычно устанавливаются на одном производственном участке, так как они дополняют друг друга.

12. Обработка профильных частей длинных рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин

Рост мощности турбин сопровождается увеличением длины рабочих частей лопаток последних ступеней. Это можно видеть на рис. 60, где показаны колеса последних ступеней ряда тур-

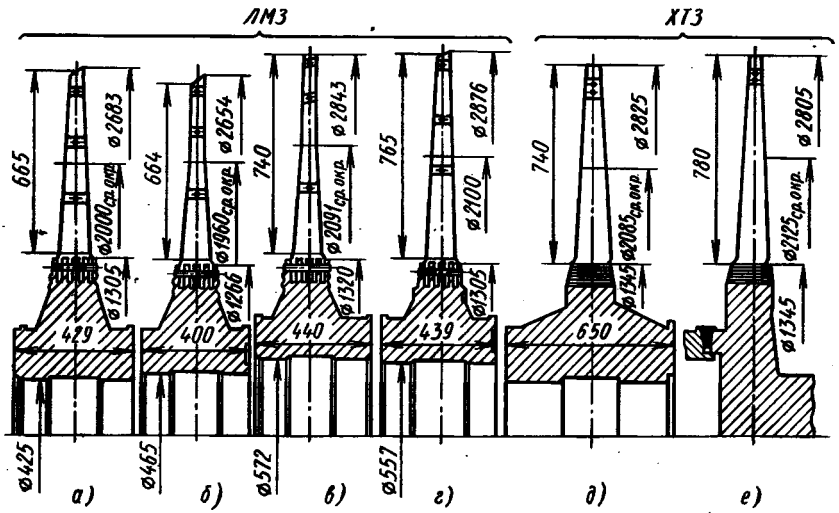


Рис. 60. Колеса последних ступеней мощных советских турбин:
а — 18-я ступень ВК-50-1; *б* — 22-я ступень СВК-150-1; *в* — 26-я ступень ПВК-200-2; *г* — 27-я ступень ПВК-200-1; *д* — 21-я ступень ВКТ-100; *е* — 21-я ступень ПВК-150

бин ЛМЗ и ХТГЗ. По сравнению с турбиной ЛМЗ СВК-150-1, где длина рабочей части последней ступени составляет 664 мм, в турбине ПВК-200-1 она равна 765 мм, а в турбине ПВК-150 ХТГЗ эта же длина составляет уже 780 мм.

При создании паровых турбин типа К-300-240 заводы спроектировали и изготовили еще более длинные лопатки. Так, ло-

патка турбины К-300-240 ЛМЗ (рис. 61) имеет длину рабочей части 960 мм, а лопатка ХТГЗ — 1050 мм. С конструктивной точки зрения указанные здесь длины лопаток не являются предельными; при использовании для лопаток титановых сплавов возможно дальнейшее увеличение их длины.

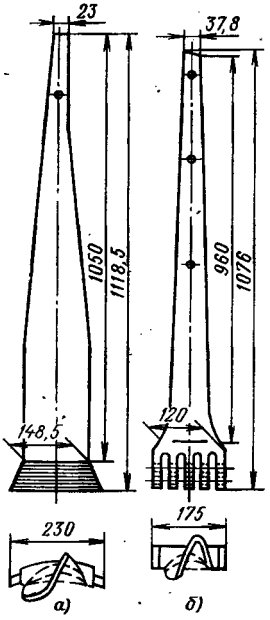


Рис. 61. Рабочие лопатки последних ступеней турбин К-300-240:
а — лопатка 5-й ступени; *б* — лопатка 29-й ступени

С возрастанием длины увеличивается и сложность профиля лопаток. Для примера на рис. 62 показана лопатка последней ступени турбины 100 МВт ХТГЗ. Из анализа этого чертежа можно установить следующие конструктивно-технологические особенности длинных лопаток:

а) значительное различие углов входа потока по высоте и связанная с этим большая закрутка профильной части, достигающая у отдельных лопаток 72° (например, верхнее сечение лопатки 29-й ступени турбины К-300-240);

б) бо́льшая ширина профиля корневых сечений;

в) малые толщина и жесткость периферийных сечений и выходных кромок лопаток;

г) наличие утолщений по профильной поверхности спинки в местах установки скрепляющей проволоки;

д) сложные криволинейные поверхности рабочей части лопатки и криволинейные кромки со знакопеременной закруткой;

е) высокая точность и чистота обработки поверхности.

В процессе постановки производства длинных лопаток возникло много новых сложных технологических задач и определилась необходимость создания новых крупных специальных и специализированных станков. Практика показала, что принципы построения технологических процессов обработки коротких лопаток не могут быть использованы при обработке длинных лопаток. Принятое для коротких лопаток чередование этапов обработки (подготовка баз, обработка хвоста, затем рабочей части и головки) также требует пересмотра. Необходима также существенная доработка и совершенствование технологичности конструкции длинных лопаток, особенно в отношении определения наиболее рациональных технических требований к ним. Процесс обработки длинных лопаток находится в стадии изучения, становления и развития. В силу указанных причин в табл. 7—12 нет схем типовых технологических процессов обработки длинных лопаток. Приводимые ниже некоторые способы обработки про-

филей длинных лопаток не могут рассматриваться как окончательно отработанные. В процессе их освоения и изучения они будут непрерывно совершенствоваться.

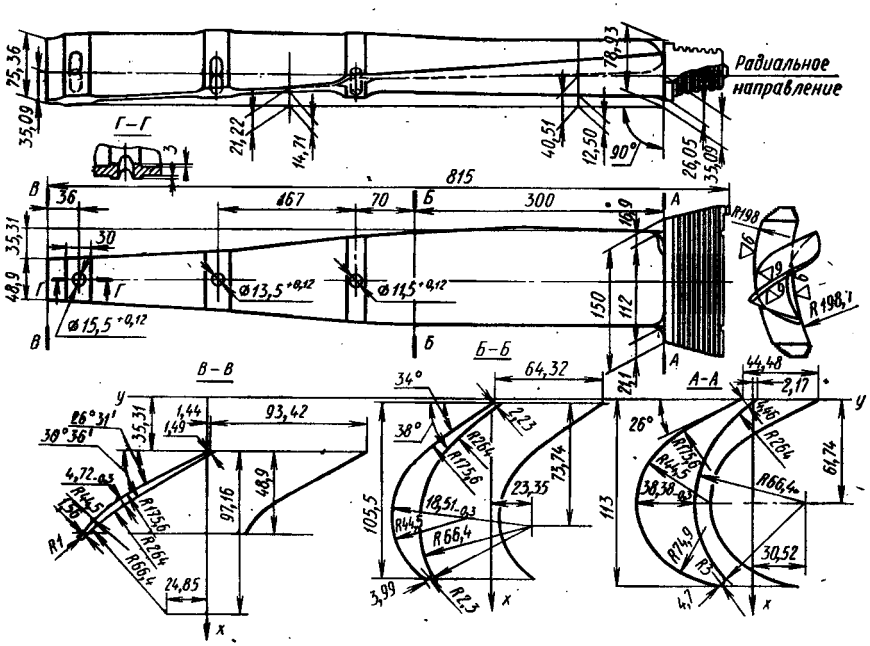


Рис. 62. Лопатки последней ступени турбины мощностью 100 МВт

Имеется четыре основных способа обработки профилей длинных лопаток:

первый — раздельная механическая обработка внутреннего и наружного профилей;

второй — круговая механическая обработка внутренней и наружной поверхностей одновременно;

третий — размерная электрохимическая обработка рабочей части;

четвертый — точная или прецизионная штамповка (вальцевание с последующим безразмерным шлифованием и полированием).

Раздельная механическая обработка осуществляется по объемным копирам (прямым или обратным) на копировально-фрезерных, копировально-строгальных и копировально-шлифовальных станках. Существуют следующие основные виды раздельной обработки:

а) внутренних поверхностей — продольными строчками на копировально-строгальных станках;

наружных поверхностей — продольными строчками цилиндрическими фрезами на копировально-фрезерных станках;

б) внутренних и наружных поверхностей — на копировально-фрезерных станках пальцевыми фрезами, продольными или поперечными строчками;

в) внутреннего профиля специальными фасонными фрезами (способ ХТГЗ), профиль которых с достаточной технологической точностью обрабатывает профили всех сечений лопатки; при обработке лопатке придается движение по копирам, обеспе-

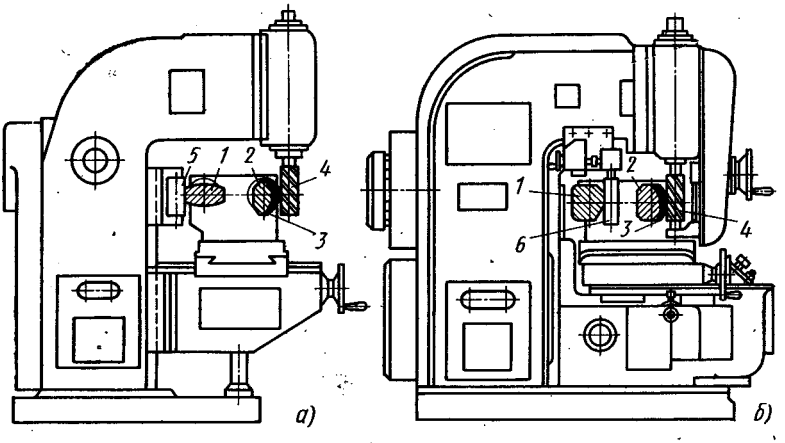


Рис. 63. Схема обработки наружного профиля длинных лопаток продольными строчками:

а — на модернизированном вертикально-фрезерном станке; *б* — на станке УФ-30; *1* — копир; *2* — оправка; *3* — обрабатываемая лопатка; *4* — фреза; *5* — ролик; *6* — ролик гидроследящей системы

чивающим заданный закон траектории движения лопатки относительно фрезы в трехмерном пространстве.

Схема обработки наружного профиля продольными строчками на вертикально-фрезерном станке показана на рис. 63, *а*. На столе станка устанавливается специальная двухшпиндельная головка с поддерживающими центрами. В переднем шпинделе устанавливается оправка с лопаткой, во втором — копир, контактируемый с роликом, прикрепленным к вертикальным направляющим станка. Постоянный контакт обеспечивается гидравликой от насосной станции или с помощью грузов, при снятом винте поперечной подачи стола. Синхронный поворот шпинделей обеспечивает подачу на строку. Из схемы видно, что применяемый в данном случае копир имеет обратный контур. Копир может быть изготовлен на этом же станке фрезерованием по эталонной лопатке. После фрезерования копир подвергают термической обработке до твердости *HRC* 50—55.

Для этой же цели созданы станки с гидроследящей системой — УФ-30 и УФ-508 (рис. 63, *б*), работающие по принципу прямого копирования. Длина обработки 1000 и 1500 мм. Давление на ролик следящей системы не выходит за пределы 1 кг, что позволяет облегчить конструкцию копиров.

На ТМЗ изготовлены сборные копиры вместо объемных для обработки лопаток длиной 1125 мм. На валике (основе сборного копира) закреплены радиально пластины толщиной 2 мм.

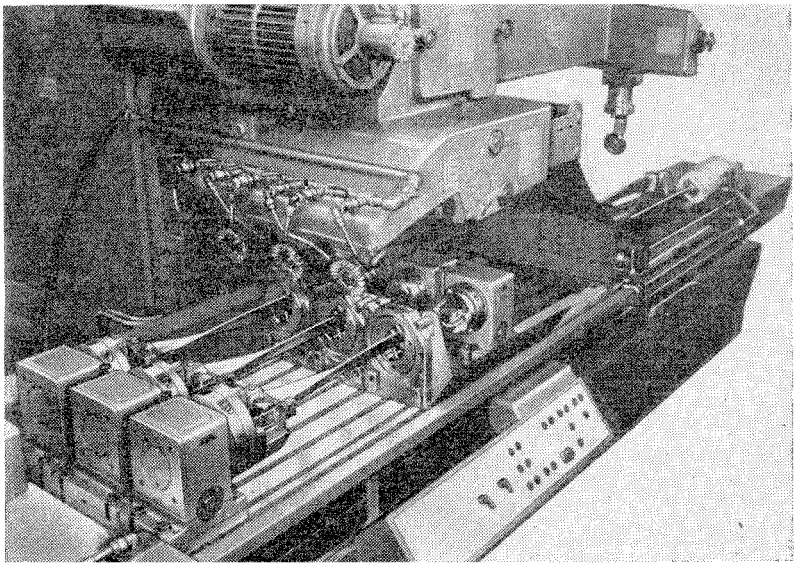


Рис. 64. Копировально-фрезерный станок для поперечного кругового фрезерования рабочих частей лопаток большой длины

Рабочая поверхность каждой из них является копией траектории движения фрезы по заданной строке. Опыт эксплуатации сборных копиров показал удовлетворительные результаты. Расчет профилей шаблонов при помощи электронно-вычислительной машины занимает не более 5 мин.

Внутренний профиль лопатки обрабатывается на копировально-строгальных станках ГД-19 и ГД-20. При большой закрутке профиля лопатке сообщается дополнительное угловое движение относительно резца для создания нормальных условий резания вдоль всего рабочего хода.

Круговая механическая обработка рабочих частей лопаток осуществляется на особых копировально-фрезерных станках продольными или поперечными строчками (рис. 64).

Станки, работающие по методу кругового фрезерования, изготовляются как гидро-, так и электрокопировальными. При полуавтоматическом цикле работы они имеют три, четыре, пять, шесть и восемь шпинделей. При обработке лопатка, установленная в приспособление, вращается, а инструмент (дисковая фреза) совершает движение по копиру. Копиры в различных конструкциях станков бывают прямые или обратные.

При фрезеровании круговыми поперечными строчками заготовкам придается вращательное движение с переменной угловой скоростью. Обработка осуществляется за два прохода: первый — предварительный — оставляет припуск 1—1,5 мм на сторону, второй — окончательный. При этом способе одновременно обрабатываются площадки под стеллитовые пластинки и утолщения под скрепляющую проволоку.

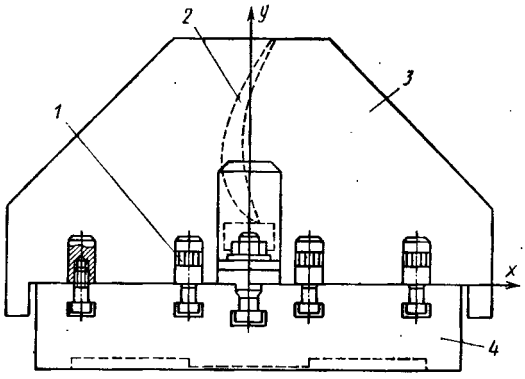


Рис. 65. Приспособление для контроля рабочей части лопатки

Станки для кругового фрезерования выпускаются для обработки лопаток разных размеров. При обработке длинных, недостаточно жестких лопаток станки снабжаются специальными люнетами с гидравлическими зажимами, обеспечивающими надежное крепление вдоль всего переменного профиля лопатки. Преимуществом кругового фрезерования является высокое качество обработки. Характерной особенностью кругового способа является постоянство технологических баз. При обработке внутреннего и наружного профилей используется одна установка без смены положения лопатки. Точность профиля при изготовлении турбинных лопаток круговым фрезерованием находится в пределах ±0,3 мм. Метод кругового фрезерования может найти широкое применение при обработке длинных лопаток.

Оценкой точности изготовления рабочей части является комплексная погрешность контура каждого сечения, которая состоит из собственного отклонения профиля, отклонения от номинального угла закрутки и смещения рабочей части относительно осей *X* и *Y*.

На рис. 65 показано приспособление с шаблонами. Приспособление состоит из основания *4* с профрезерованными продольными пазами; набора штифтов *1* для крепления шаблонов и набора шаблонов по сечениям *3*. Основание, штифты и шаблоны изготовляются по второму классу точности. Такое приспо-

собление позволяет ориентировать в пространстве положение лопатки и шаблона относительно осей X и Y (см. рис. 50, *б*). Отклонение профиля рабочей части лопатки *2* от размеров чертежа в направлении осей координат определяют путем замера зазоров между шаблоном и поверхностью лопатки в каждом сечении. Проверка производится пластинчатым щупом. Отклонение от оси контролируют глубиномером.

Недостатком этого метода проверки профиля лопатки является малая производительность и невысокая точность измерения. Более целесообразно было бы использовать два комплекта шаблонов. Первый — для контроля профиля свободным приложением; второй — аналогичный указанному на рис. 65, но выпол-

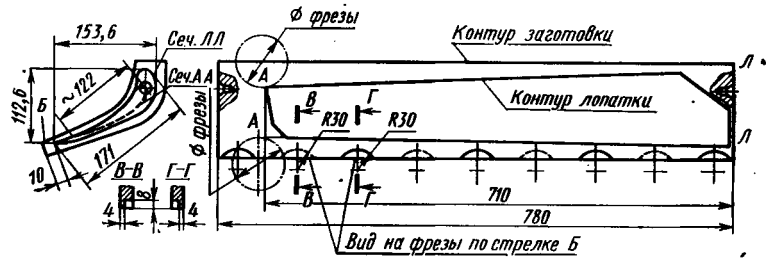


Рис. 66. Направляющая лопатка и заготовка для нее

ненный с зазорами от теоретического профиля, рассчитанными с учетом допустимых отклонений рабочей части от осей X и Y и по углам входа и выхода. Если сечения лопатки свободно разместились в окне, образованном при соединении двух шаблонов и выполненном, как указано выше, с учетом допустимых отклонений,— это означает, что все отклонения находятся в пределах допустимых. Задача конструкторов и технологов найти правильное решение вопросов измерения. Целесообразно также использовать опыт авиационной промышленности по применению оптических методов контроля [17]. Методы базирования длинных лопаток также подлежат изучению.

Хорошие результаты были получены на Турбомоторном заводе при обработке направляющих лопаток сложнопространственной формы на центрах (рис. 66). Центровые отверстия диаметром 5 мм и с углом 60° сверлились в торцах заготовки в районе максимальной толщины (сеч. *ЛЛ*). Осевая линия центров находилась параллельно базовой линии, проходящей через выходную кромку. Технологический припуск на выходной кромке шириной 10 мм служил для крепления к упорам, определяющим повороты лопатки. Одновременно этот припуск увеличивал жесткость наиболее тонкой части профиля — выходной кромки.

На технологическом припуске выполнялись врезы $R = 30$ мм (сеч. *ВВ* и *ГГ*) для прижимных планок, что было необходимо для предохранения прижимов от срезания фрезой. На рис. 67

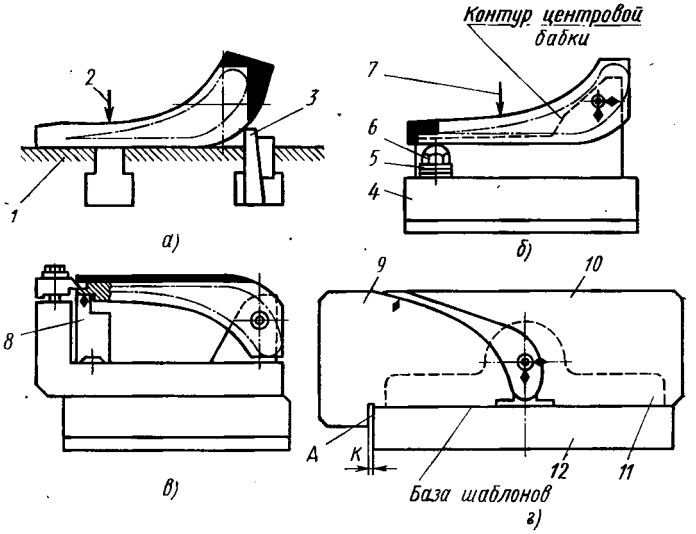


Рис. 67. Схема обработки кованой заготовки лопатки сложнопространственной формы:

а — подготовка баз под центрование; *б* — *в* — подготовка базовых плоскостей после центрования; *г* — схема измерения; *А* — мерительная плоскость; *К* — щуп на величину допуска; *1* — стол станка; *2* — прижим; *3* — упор в паз станка; *4* — основание приспособления (центровая бабка не показана); *5* — регулировочные шайбы; *6* и *8* — сменные опоры; *7* — сменный прижим, устанавливаемый на центровой бабке; *9* — шаблон внутреннего профиля; *10* — шаблон наружного профиля; *11* — центровая бабка; *12* — основная плита мерительного приспособления

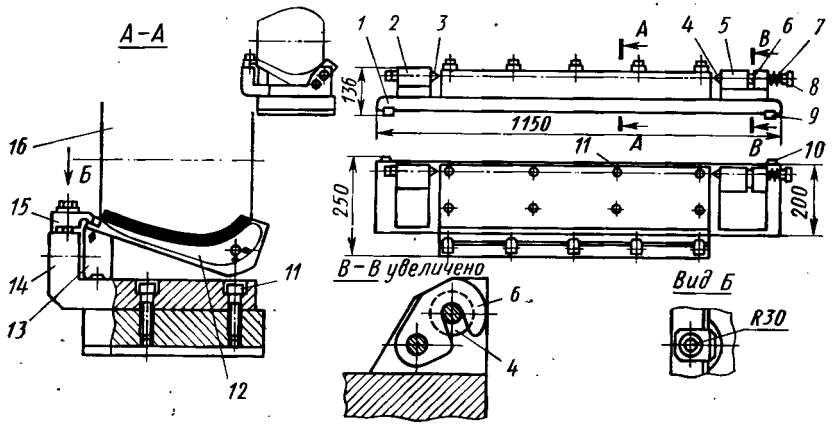


Рис. 68. Центровое приспособление для обработки лопаток:

1 — основание; *2* — центровая бабка поджимного центра; *3* — центр поджимной; *4* — центр опорный быстроотводной; *5* — бабка упорная; *6* — откидной упор; *7* — пружина; *8* — головка центра; *9* и *10* — опоры, работающие по принципу синусной линейки для установки под углом; *11* — винты крепления корпуса сменных опор; *12* — заготовка лопатки; *13* — сменная опора; *14* — корпус сменных опор; *15* — прижим; *16* — фреза

показано несколько положений лопатки в процессе обработки. Приспособление (центровое) показано на рис. 68. В одном приспособлении, с применением сменных опор *13*, выполнялись все операции, связанные с подготовкой баз и профилированием. Установка в центрах обеспечила высокую точность обработки.

Использование центровых приспособлений позволяет применить установочные шаблоны, значительно сокращающие время установки заготовок и исключающие брак лопаток, возможный при неправильной наладке операции. Шаблоны представляют собой пластины, выполненные по размерам и форме сечения заготовки, которые она должна иметь после данной операции (например, поз. *12*, рис. 68). Шаблон имеет отверстие, ось которого расположена соответственно положению оси центров приспособления. Этим отверстием шаблон устанавливается на валик и вместе с валиком в центра приспособления. К шаблону подводится фреза, и путем перемещения всего приспособления относительно фрезы, а также подналадки опоры *13* добиваются совпадения профиля фрезы и профиля шаблона. При их совпадении установка будет правильной как по профилю, так и по глубине фрезерования.

Без применения шаблонов уточнение установки осуществляется путем опытных проходов, на что затрачивается много времени. В рассмотренном примере при длине лопаток, включая и технологический припуск, равной 810 мм, благодаря применению шаблонов на каждой установке экономилось от 2 до 3 ч рабочего времени.

13. Обработка головок, сверление, шлифование, контроль лопаток

Головки лопаток можно разделить на две группы: а) с шипами и б) с утонением. Шипы бывают профильные, прямоугольные и круглые. Размеры шипов выполняют по 4-му классу точности.

Процесс обработки круглых шипов у головок лопаток (рис. 69) состоит из следующих операций: 1) фрезерование (прорезка) шипов; 2) фрезерование прорезанных шипов на прямоугольник (при больших размерах профилей); 3) закругление первого шипа; 4) закругление второго шипа. На рис. 69, *а* показано положение лопатки под фрезерование на прямоугольник (опер. 2) и закругление шипов (опер. 3 и 4). Черным показан слой металла, снимаемый при обтачивании; штриховкой — при дополнительном фрезеровании.

Закругление шипов выполняется на горизонтально-фрезерных станках при помощи патрона, показанного на рис. 69, *б*. Патрон имеет ползушку, в которой закрепляется резец. Передвигая ползушку, можно установить резец для обточки шипов разных размеров.

На рис. 69, *в* и *г* показаны формы утонения головок, а на рис. 69, *д* способ установки и обработки. Головки лопаток с утонением обрабатываются в две операции: подрезка головного торца и фрезерование утонения. Схема универсального приспособления для фрезерования утонения показана на рис. 69, *д*. Лопатка *2* закрепляется на пружинном столе *4* приспособления. К торцу стола крепится копир *3*. Ролик *1* свободно вращается на оправке. При движении стола станка пружинный стол *4* приспособления под давлением ролика совершает движение в вертикальном направлении, а фреза обрабатывает утонение по профилю лопатки.

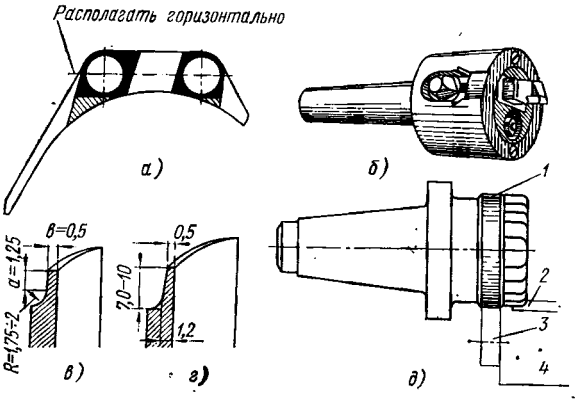


Рис. 69. Формы шипов головок лопаток и инструменты для их обработки:

а — круглые шипы, *б* — патрон для обтачивания шипов; *в* и *г* — формы утонения; *д* — схема обработки утонения; *1* — ролик; *2* — лопатка; *3* — копир; *4* — пружинный стол

Отверстия для скрепляющей проволоки сверлятся в лопатках по кондуктору с последующей проверкой по шаблону и калибру.

Полуотверстия в плоских хвостах лопаток с вильчатыми профилями фрезеруют дисковыми радиусными фрезами. Припуск для обработки этих отверстий (рассверливание и развертывание) в сборе после облопачивания оставляют 2 мм на диаметр.

После механической обработки лопатки шлифуют и полируют. Шлифование ведется абразивными кругами или войлочными кругами и лентами с наклеенным абразивом зернистостью номеров 25—16 по ГОСТу 3647—71. В лопаточном производстве широко применяют следующие копировально-шлифовальные станки: ЛШ-1 — для компрессорных лопаток длиной до 150 мм; ХШ-185 — для внутренних, а ХШ-89 и ХШ6-01 — для наружных профилей постоянного сечения лопаток паровых турбин.

Применяется также полировальный полуавтомат типа ДШ-1 для обработки коротких лопаток и станок ВТ-24 для шлифования лопаток переменного сечения длиной до 800 мм. Важнейшей задачей совершенствования технологии в турбинной промышленности является полная механизация шлифовальных и полировальных операций.

Полирование лопаток производят войлочными или фетровыми кругами с наклеенным абразивом зернистостью 10. Под полирование оставляют припуск 0,05 мм. После полирования чистота поверхности должна быть в пределах 8—9-го классов

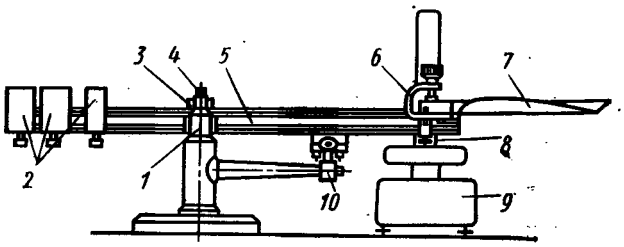


Рис. 70. Схема взвешивания лопатки на моментных весах

При окончательном контроле, наряду с полным обмером и магнитно-кислотными испытаниями, производят взвешивание лопаток и комплектование их в пакеты одинакового веса под облопачивание.

Лопатки длиной свыше 300 мм развешивают на моментных весах, что является необходимым, потому что у длиных лопаток одинакового веса наблюдается значительный разброс расположения центров тяжести вдоль лопатки. Последнее, являясь следствием неравенства отклонений по толщине одноименных сечений пера разных лопаток, приводит к нарушению динамического баланса облопаченного диска. Для исключения этой возможности требуется подбирать лопатки попарно с одинаковыми моментными весами и устанавливать их на диске диаметрально противоположно.

Моментные весы (рис. 70) состоят из коромысла *5* с ножевыми опорами *4*; подушек ножей *3*, установленных на стойке *1*; зажимного устройства *6* с сменными упорами *8*, выполненными соответственно профилю хвоста лопатки *7*; противовесов *2* со стопорными винтами; кронштейна *10* с арретиром и циферблатных весов *9*.

Взвешиваемую лопатку фиксируют по упорам *8* и зажимают винтами. Длина правого плеча от ножей *4* до упора *8* равна радиусу гребня диска, подлежащего облопачиванию. Передвигая противовесы *2*, доводят отклонение стрелки весов примерно до половины шкалы (400—600 г) и закрепляют противовесы винтами. Такое положение противовесов должно сохраняться

неизменным в процессе взвешивания всего комплекта лопаток. Лопатки после взвешивания подбирают попарно с одинаковыми моментными весами и маркируют. Для попарной группировки лопаток заводы успешно применяют электронно-вычислительные машины (ЭВМ).

Опыт показал, что развешивание лопаток на моментных весах, хотя и требует более длительного времени, чем развешивание по пакетам, но зато резко сокращает время на статическую балансировку. Применение ЭВМ для попарного группирования, ускоряя процесс группирования, повышает его точность, исключает необходимость съема металла с диска при статической балансировке после облопачивания.

14. Перспективы развития технологии лопаточного производства

Серийное производство турбин, вызванное задачами быстрого развития энергетики страны, содействовало ускоренному техническому прогрессу в турбиностроении. Большинство ручных операций теперь механизировано. Приспособления снабжаются пневматическими и гидравлическими зажимами с гидроусилителями, с устройством которых можно познакомиться по специальной литературе. Турбиностроительные заводы совершенствуют технологическую оснастку, повышая ее эффективность, создают систему универсально-сборных приспособлений, пригодных для использования в лопаточном производстве.

Значительный технический прогресс в технологии турбиностроения будет достигнут при организации централизованного производства турбинных лопаток, подготовка к которому широко осуществляется в настоящее время.

15. Облопачивание дисков и роторов турбин

Процесс облопачивания заключается в сборке частей ротора или статора турбины с лопатками и является одной из наиболее ответственных операций технологического процесса изготовления турбины. От качества выполнения облопачивания зависит надежность работы турбины как лопаточного двигателя.

К облопачиванию предъявляются следующие основные требования: лопатки должны плотно сидеть в пазах или на гребнях дисков и вместе с тем плотно прилегать друг к другу; они должны также правильно устанавливаться как в аксиальном, так и в радиальном положении; бандажная лента должна плотно прилегать к головкам лопаток и иметь надежную расклепку го-

ловок; скрепляющая проволока должна быть свободно заведена в отверстия лопаток и хорошо припаяна. Величина допустимых отклонений указывается при рассмотрении операций.

Типовой технологический процесс облопачивания дисков с Т-образным пазом включает следующие операции:

а) установка диска на стойки для облопачивания;

б) разметка, вырубка и припиливание замковых колодцев, т. е. выемки на ободе, в которые будут заводиться лопатки;

в) облопачивание диска рабочими лопатками;

г) подгонка и установка замка;

д) обандаживание рабочих лопаток (подготовка бандажей; пробивка отверстий под головки лопаток; надевание бандажей на лопатки и расклепка шипов лопаток);

е) протачивание торцов бандажа на токарном или карусельном станке до чертежных размеров и снятие фасок;

ж) подготовка облопаченного и обандаженного диска под пайку скрепляющей проволоки (запиливание и зачистка бандажей после обтачивания: установка сегментов проволоки под пайку согласно чертежу);

з) припайка проволоки к лопаткам серебряным припоем;

и) промывка диска горячим паром для снятия флюса;

к) статическая балансировка диска.

Диски с Т-образными и им подобными пазами облопачиваются в вертикальном положении, подвешенными за отверстие на оправках. Роторы устанавливаются на деревянных опорах (рис. 71). Облопачивание роторов выполняется бригадой слесарей.

Чтобы лопатки можно было заводить в паз диска, в ободе вырубают выемки по форме и размерам хвоста лопатки (или

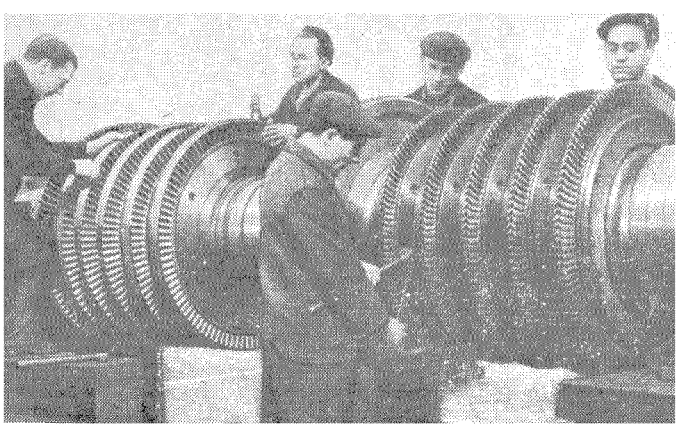


Рис. 71. Облопачивание ротора высокого давления мощной турбины

промежуточного тела), которые называются замковыми колодцами. Обычно на диске делают два замковых колодца, расположенных диаметрально противоположно. После наборки лопаток замковые колодцы заделывают замками.

Некоторые из конструкций замков показаны на рис. 72. Замки типа *а* и *г* применяются при наборке лопаток с отдельными промежуточными телами. Для замка, изображенного на рис. 72, *а*, стенки колодцев должны быть выполненными наклонно по форме «ласточкина хвоста». Для этого, после вырубки уширения для заведения лопаток, стенки колодца тщательно

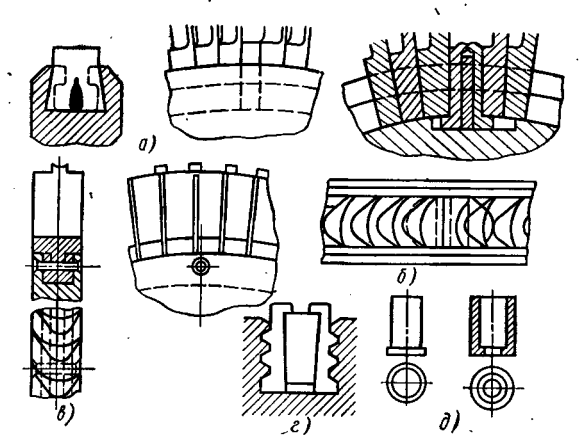


Рис. 72. Наиболее часто встречающиеся типы замков:
а — клиновой замок; *б* — *г* — сложные замки; *д* — заготовка для замковых вставок

запиливают по шаблону. На рис. 72, *б* показан замок, у которого дно паза углубляется фрезой, а заплечики замковых вставок подводятся под крайние лопатки.

Места для замков во всех случаях должны быть тщательно подготовлены перед наборкой лопаток. Перед вырубкой замковых колодцев должно быть учтено направление вращения дисков. После вырубки колодца запиливают фаски, тщательно очищают паз и слегка смазывают его тонким слоем машинного масла.

Наборка лопаток должна производиться с соблюдением последовательности, указанной в паспорте развески, и с соответствующей пригонкой их друг к другу. Лопатки должны плотно прилегать одна к другой — щуп 0,05 мм между лопатками не должен проходить. Пригонку ведут за счет припиливания наружной радиальной поверхности хвоста лопатки или промежуточного тела с проверкой прилегания ее по краске к внутреннему профилю предыдущей лопатки. При плоских радиальных

поверхностях пригонку можно вести по пояскам шириной 10—15 мм, как показано на рис. 17.

После пригонки лопатки прогоняются по пазу до места. Прогонка — доведение лопаток до места — производится путем ударов молотка весом 2—2,5 кг через оправку из красной меди (выколотку), опирающуюся на внутренний профиль хвоста лопатки. Возможно применение пневматических молотков с медными вставками. При пригонке профилей необходимо следить за тем, чтобы опиловкой не были нарушены радиальный угол хвостов и, следовательно, радиальное положение лопаток.

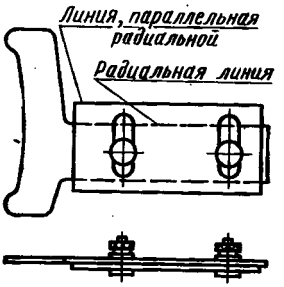


Рис. 73. Радиальная линейка

Проверка радиального положения лопаток постоянного сечения производится с помощью универсальной радиальной линейки (рис. 73), а длинных лопаток переменного сечения — специальными шаблонами. Допускаемые отклонения, в зависимости от длины, у верхнего конца лопатки составляют от ±0,5 до ±2,0 мм. Радиальная линейка позволяет проверить положение кромки лопатки, определяемое по чертежу облопачивания.

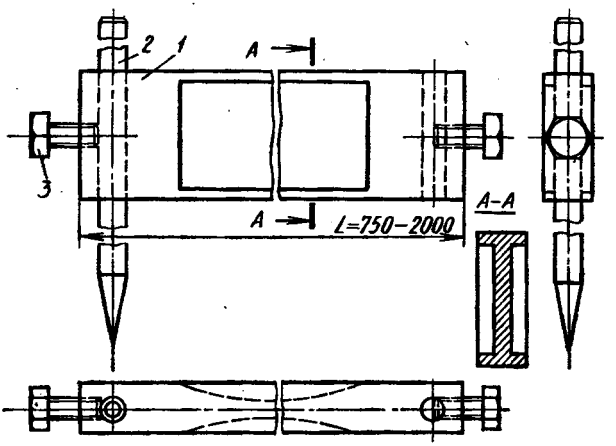


Рис. 74. Линейка для проверки аксиального положения лопаток:

1 — линейка; *2* — чертилка; *3* — винт для крепления чертилки

Проверка аксиального положения лопаток от ступицы диска производится аксиальной линейкой (рис. 74). Чертилка линейки выставляется по минимальному предельному размеру, а максимальное отклонение контролируется с помощью щупа.

Щуп толщиной, равной допуску, не должен проходить между лопаткой и чертилкой. Допускаемое отклонение лопатки от теоретического аксиального положения указывается в чертеже облопачивания и колеблется от ±0,2 до ±1,5 мм, сообразно длине лопатки.

Установка скрепляющей проволоки показана на рис. 75. Проволока *1* соединяет несколько лопаток в пакет. Диаметры отверстий 3 в лопатках делаются на 0,2—0,5 мм большими диаметра проволоки. Проволока припаивается к лопаткам серебряным припоем. Соседние пакеты иногда связывают между собой при помощи мостика *2*, который припаивается к нескольким лопаткам левого пакета и проходит через отверстия в нескольких лопатках правого пакета.

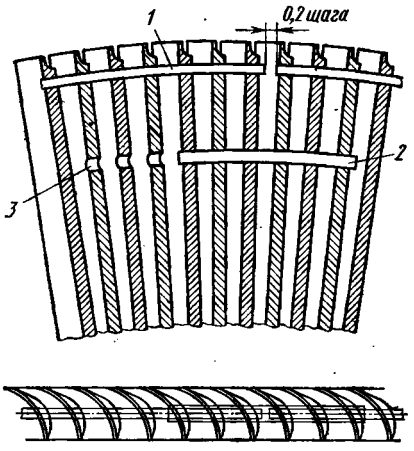


Рис. 75. Скрепляющая проволока

В последних ступенях мощных турбин устанавливается демпферная проволока, набираемая из двух проволок полукруглого сечения. Каждая из этих проволок состоит по длине из нескольких секций. Секции той и другой проволоки (полусечения) устанавливаются в отверстиях лопаток со взаимным смещением на полдлины, связывая таким образом все лопатки одним, как бы цельным, кольцом. Концы секций отгибаются для предотвращения их взаимного перемещения. Демпферная проволока к лопаткам не припаивается.

Подгонка лопаток под замок и заделка замка. При наборке лопаток на диск следует учитывать их количество. Фактическое количество лопаток на диске может быть меньше или больше указанного на чертеже в пределах не более 2%. Для контроля количества набранных лопаток диск надлежит разметить мелом на несколько участков и по мере наборки регулировать количество лопаток путем пригонки.

При подходе к замку обычно оказывается, что последняя лопатка выступает в замковый колодец больше, чем требуется по чертежу. Тогда замеряют получившийся излишек и путем спиливания с хвостов нескольких лопаток слоя материала толщиной 0,1—0,5 мм устанавливают требуемое выступание последней лопатки в замок, которое выполняют обычно с припуском против чертежного 0,5—1 мм. Затем изготовляют из красной меди клин и забивают его в замковый колодец до полного уплотнения лопаток. При этом оставленный припуск почти полностью выбирается.

При забивании клина, он, уплотняя лопатки, сам также несколько обминается, и на его поверхности остаются следы натиров. Положение клина, после забивания его в паз до отказа, отмечают риской, после чего клин, вынимают и измеряют. По фактическим размерам клина изготовляют замковую лопатку (или вставку) с припуском в тангенциальном направлении 0,1—0,15 мм, а в аксиальном с зазором 0,05—0,1 мм. Замковую лопатку устанавливают на место с помощью сильных ударов молотка соответствующего веса. Таким образом, ранее вставленный на место замковой лопатки клин послужил эталоном для определения правильных размеров замковой лопатки.

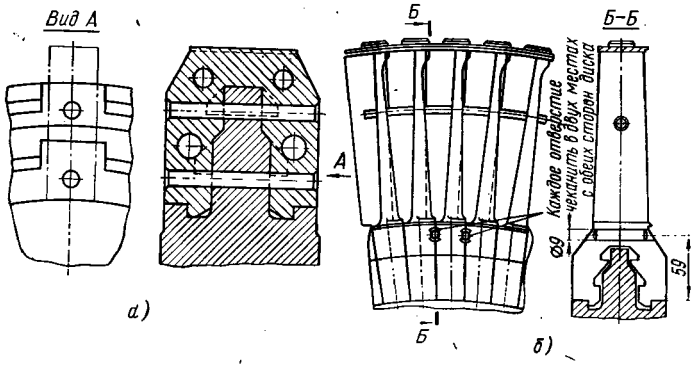


Рис. 76. Некоторые типы замков при посадке лопаток с грибовидными хвостами

Клинья замков (см. рис. 72, *а*, *б*, *г*) должны выполняться точно по замерам с места, для того чтобы обеспечить плотное прилегание частей замка к стенкам колодцев (см. рис. 72, *а*, *г*) или надежное уплотнение лопаток (см. рис. 72, *б*).

В современных конструкциях облопачивания замки крепятся заклепками, как показано на рис. 72, *в*.

Замок, показанный на рис. 72. *б*, удерживается своими заплечиками за крайние лопатки. Заготовки замка (см. рис. 72, *д*) выполняются точеными.

При Т-образных хвостах с заплечиками (см. рис. 23, *в*), а также при хвостах с усилением необходимо обеспечивать плотное прилегание лопаток к опорным поверхностям паза в диске. С этой целью под каждую лопатку подкладывают упорные пластинки или куски проволоки из мягкой стали. На ЛМЗ для этого применяют ленточные пружинки из стали 65Г.

Облопачивание дисков с грибовидными венцами. Для наборки лопаток с грибовидными хвостами на диск требуется в одном или двух диаметрально противоположных местах срезать выступы профиля, как показано штрихпунктиром на рис. 76, *а*. Эти места после наборки лопаток заполняются замками.

На ХТЗ для наборки таких лопаток принята следующая технология. Нештатная лопатка пригоняется по венцу диска, после чего в шести-восьми местах проверяется зазор между этой лопаткой и диском. При правильной величине зазора фрезеруют опорные поверхности (рис. 76, *б*) одной из штатных лопаток. Лопатка пригоняется по венцу; при этом проверяются тангенциальное и радиальное положения лопатки и зазоры хвостового соединения. При фрезеровании опорных поверхностей штатных лопаток по результатам поверки первой лопатки строго выдерживают их посадочные размеры. Затем производится наборка лопаток с соблюдением требований к сборке и контролю, рассмотренных выше.

Некоторые типы замков также показаны на рис. 76. Замок (рис. 76, *а*) применяется для тяжелых лопаток и крепится заклепками.

При не очень длинных лопатках применяется специальная замковая лопатка, которая крепится к соседним лопаткам двумя штифтами, как показано на рис. 76, *б*. Отверстия под штифты сверлят и развертывают после постановки замковой лопатки.

Клин и шпонки замка первой ступени цилиндра низкого давления турбины пригоняются по фактическим размерам посадочных мест в местах установки шпонок. Для создания необходимого натяга в местах установки шпонок производится подчеканка хвостов лопаток бойком, имеющим радиус 4 мм.

Облопачивание дисков с верховой посадкой лопаток. Диски с верховой посадкой лопаток под облопачивание укладывают на специальные столы. Перед облопачиванием проверяют правильность посадки лопаток на гребни диска и, если требуется, пазы припиливают, чтобы лопатка садилась на гребни диска с требуемой плотностью. Пригонка многовильчатых хвостов представляет весьма сложную задачу, поэтому поиски технологов постоянно направлены на то, чтобы исключить указанную пригонку. С некоторыми работами в этой области можно познакомиться по отраслевой литературе [4]. Посадку лопаток с помощью пресса без предварительной пригонки нельзя считать приемлемой из-за возможности создания в соединении больших напряжений, не поддающихся контролю и не учтенных расчетами. Эти напряжения могут привести к поломке дисков.

При правильной пригонке лопатки должны садиться на гребни диска под воздействием: при одном гребне — усилия руки; при трех гребнях — усилия руки или легких ударов молотка массой 300 г; при четырех гребнях — ударов молотка массой 500 г; при пяти гребнях — ударов молотка массой 800 г.

После пригонки лопаток по гребням дисков приступают к наборке. При наборке необходимо следить за тем, чтобы лопатки плотно прилегали друг к другу в тангенциальном направлении и плотно садились на гребни диска с соблюдением всех

установленных требований к соединению между гребнями дисков и пазами лопаток.

Пригонку хвостов ведут со стороны наружного конуса; выводить риски от фрезы не обязательно. Плотное прилегание лопаток друг к другу по радиальной плоскости хвостов достаточно обеспечивать на длине 10—15 мм, как показано ранее на рис. 17. При наборке лопаток необходимо следить, чтобы они были установлены правильно. При наличии набегания шага или отклонений от радиального положения следует опилить хвост лопатки с наружной стороны конуса. Пакеты лопаток одинакового веса устанавливают диаметрально противоположно соответственно паспорту развески. Установку скрепляющей проволоки следует производить после установки пакета.

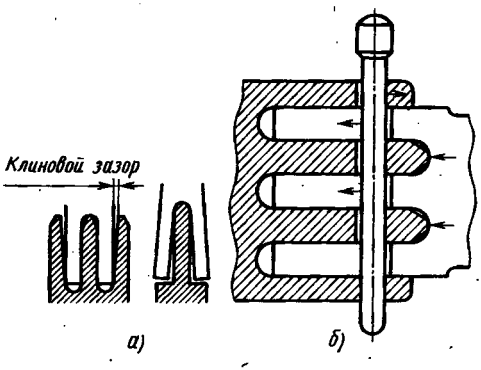


Рис. 77. Схема образования клиновых зазоров вследствие неправильной пригонки лопаток по гребню дисков (*а*), схема притягивания лопаток к гребню дисков коническими штифтами (*б*)

При посадке лопаток на гребни диска следует обращать внимание на то, чтобы вследствие тугой посадки не произошло расклинивания вилки хвоста или наружных гребней обода диска (рис. 77, а). Наличие расклинивания определяется по образованию конусных зазоров. Лопатки должны сидеть на гребнях дисков с натягом. Такая посадка обеспечивается коническими технологическими штифтами и некоторым смещением отверстий в дисках и лопатках (рис. 77, б). Величина смещения должна составлять не более 0,2—0,3 мм. Чтобы обеспечить необходимый натяг между лопатками в тангенциальном направлении, наборку их ведут пакетами. Сначала устанавливают первую лопатку пакета и стопорят ее через отверстие коническим штифтом. Затем, насаживая на гребни лопатки всего пакета, производят подгонку их друг к другу, проверяя при этом совпадение отверстий в лопатках и в гребне диска. После подгонки последней лопатки, средние, уже насаженные лопатки пакета, немного отводятся от гребня диска, последняя лопатка пакета устанавливается на место и крепится коническим штифтом. Последняя лопатка в пакете по своим размерам должна быть наибольшей, чтобы создать соответствующий натяг между лопатками.

После заклинивания последней лопатки все лопатки пакета доводятся до места посадки при помощи ударов молотка по хвосту через медную оправку и закрепляются коническими

штифтами. При указанном способе посадки обеспечивается определенный натяг между лопатками. Для предупреждения вредного влияния конических штифтов, которые могут препятствовать уплотнению лопаток в тангенциальном направлении, необходимо следить за тем, чтобы смещение отверстий в лопатках и диске было только в радиальном направлении и совершенно отсутствовало в тангенциальном направлении. Те отверстия в лопатках, которые имеют смещение против отверстий в дисках и в тангенциальном направлении, должны быть расширены напильником, чтобы дать возможность коническим штифтам закрепить плотно лопатки. После окончательной наборки лопаток конические штифты забиваются полностью в оба ряда отверстий диска.

Скрепляющая проволока заводится в отверстия лопаток по мере наборки лопаток. Последний пакет лопаток набирается сначала без скрепляющей проволоки. Затем, после подгонки и создания соответствующего натяга, лопатки вынимаются, заводится проволока, и лопатки устанавливают вновь всем пакетом. Осаживая поочередно каждую лопатку, пакет доводят до места и заклинивают коническими штифтами. После окончательного расклинивания лопаток диск проверяется контролером ОТК и направляется на сверление и развертывание отверстий под заклепки. Эта операция производится на радиально-сверлильном станке.

Рассверливание и развертывание отверстий под заклепки и установка заклепок ведется в следующем порядке. Выбивают первый ряд конических штифтов и рассверливают отверстия первым сверлом (диаметр этого сверла меньше окончательного диаметра отверстия на 1,2 мм). Рассверливают отверстия под черновую развертку, т. е. с припуском 0,3 мм на диаметр. Отверстия предварительно развертывают с припуском 0,1 мм на диаметр, а окончательно — до размера заклепки по 2-му классу точности. Поверхность заклепочных отверстий не должна иметь задиров и черновин. При развертывании следят за размером отверстий, проверяя их по заклепкам.

Установка заклепок должна производиться легкими ударами молотка массой не более 300 г. Такого сопряжения добиваются путем сортировки заклепок по размерным группам в пределах разницы в диаметрах до 0,01 мм и подбора под каждую группу соответствующей развертки. Потом раззенковывают отверстия первого ряда и устанавливают заклепки в правом ряду. Рассверливание и развертывание отверстий второго ряда и установка заклепок ведутся аналогично установке заклепок в первом ряду. После установки заклепок производится зенкование отверстий с обратной стороны диска, для чего последний должен быть перекантован.

Расклепывание заклепок ведется обычным способом или на специальном оборудовании.

Облопачивание дисков с осевой заводкой лопаток в пазы диска применяется в газовых турбинах и вызвано определенными условиями работы лопаток в них. На рис. 78 показан один из способов крепления таких лопаток на диске (роторе). При установке каждая лопатка должна прилегать нижней опорной поверхностью к пазу, а между верхними опорными поверхностями должен иметься зазор порядка 0,04—0,1 мм, в зависимости от размеров хвоста. Это требование относится к лопаткам, изготовленным из аустенитной стали и ротору, изготовленному

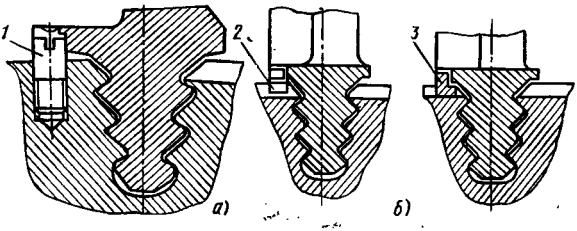


Рис. 78. Лопатки с осевой заводкой в пазы диска и способы закрепления лопаток на диске:
а — стопорение винтом; *б* — стопорение планкой

из перлитной стали, и учитывает разные коэффициенты линейного расширения этих сталей.

В случае изготовления лопаток и ротора из перлитной стали плотность прилегания при сборке может быть достигнута либо по верхней, либо по нижней опорным поверхностям. Прилегание на второй поверхности произойдет при работе турбины благодаря тепловой деформации материала лопаток. Так, например, ЛМЗ на своей газовой турбине ГТ-25-700-1 до установки стопорных пластин (в турбине ГТ-25-700-1 они устанавливаются под лопаткой) после наборки лопаток допускает их качку в тангенциальном и в осевом направлениях в соответствии с техническими условиями.

Процесс облопачивания осуществляется в следующей последовательности. Диск или ротор подготовляются под заводку лопаток. Производится скругление острых кромок в пазах дисков и очистка пазов от грязи и масла. Протираются лопатки и внешним осмотром определяется качественное состояние их поверхностей. Заводка лопаток в пазы диска производится в соответствии с номерами, присвоенными им при взвешивании на моментных весах; лопатки должны входить от нажатия рукой. После доводки лопатки до места устанавливают стопор *3*, удерживающий лопатку в осевом направлении. Сам стопор удержи-

вается от смещения специальной канавкой в диске. Последнюю лопатку стопорят винтом *1* или стопорной планкой *2* с подгибкой ее плечиков на лопатку.

Все установленные лопатки должны иметь качание в тангенциальном направлении. Величина качания указывается на чертеже. Качание следует проверять в процессе установки каждой лопатки и стопора в отдельности. При отсутствии качания не-

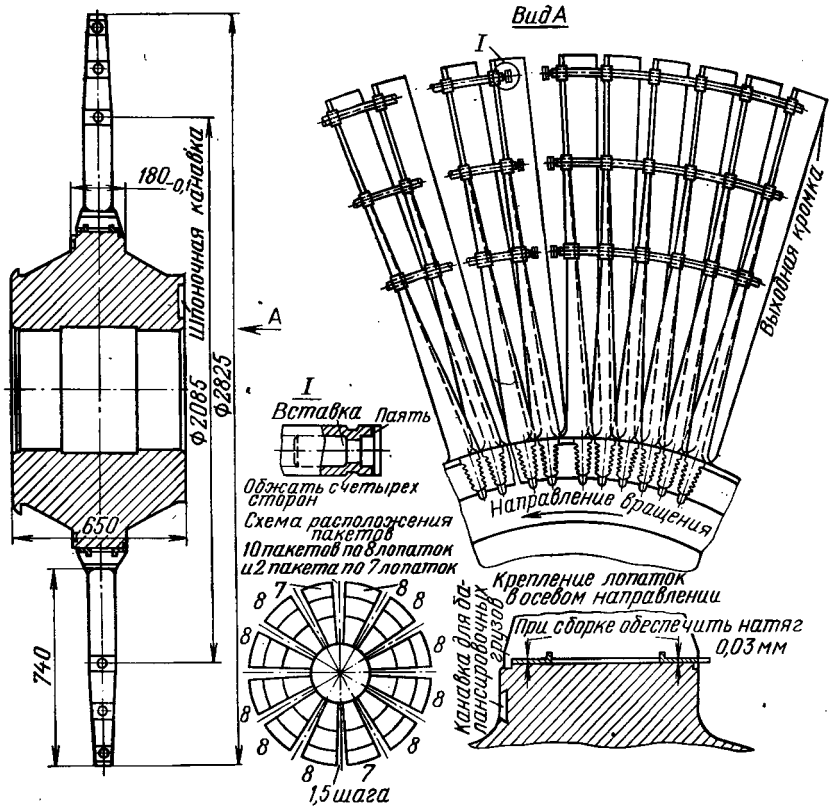


Рис. 79. Облопаченный диск турбины ВКТ-100

обходимо выяснить причину и устранить ее. Слесарная пригонка профилей паза диска или лопатки недопустима. Тугие лопатки должны заменяться.

После наборки производится механическая обработка торцов лопаток. Для устранения качания лопаток во время проточки торцов их головок лопатки оплетают резиновым шнуром.

Наборка лопаток с торцовым елочным радиусным хвостом. На рис. 79 показан чертеж облопаченного диска и одного из пакетов лопаток последней ступени турбины 100 МВт ХТЗ.

Здесь применены елочные радиусные хвосты и три ряда связей трубчатого сечения. Концы трубок закрыты пробками, которые припаяны серебряным припоем (см. место *I*). В пакет соединяются семь-восемь лопаток.

Применяется следующая технология наборки. Лопатки заводятся предварительно без стопорных пластин каждая в свой паз, в соответствии с паспортом развески. Никакой припиловки хвостов и пазов не допускается — конструкция и технология их обработки обеспечивают необходимую точность соединения. Лопатки расклиниваются к периферии, после чего замеряются зазоры между лопаткой и дном паза. По этим замерам шлифуются стопорные пластины, лопатки вынимаются и снова набираются с соответствующими стопорными пластинами. После загиба пластин концы их проверяются травлением на отсутствие трещин. Предусматривается проверка установки лопаток в тангенциальном и радиальном положениях.

Общие замечания по облопачиванию статоров. У реактивных турбин и осевых компрессоров газовых турбин направляющие лопатки собираются непосредственно в пазы, проточенные в цилиндре. Процесс облопачивания статоров по существу ничем не отличается от процесса облопачивания рабочих колес и роторов. Так же, как у дисков производится подгонка лопаток под замок, у статоров производится подгонка лопаток под разъем.

Концевые лопатки, устанавливаемые на разъемах, должны иметь между собой точно определенный шаг в верхней и нижней половинах статора. К концевым лопаткам припаиваются специальные промежуточные тела, после чего лопатки плотно забиваются в пазы корпуса и укрепляются в них расчеканкой. После этого хвосты лопаток запиливаются заподлицо с разъемом цилиндра.

Горизонтальные стыки цилиндров после облопачивания проверяются и пришабриваются с целью ликвидации неплотностей, появившихся вследствие развода верхней и нижней половин статора при облопачивании.

На рис. 80 показано крепление направляющих лопаток у горизонтального разъема корпуса осевого компрессора турбины. В процессе наборки проверяют прилегание хвостов лопаток друг к другу по краске и щупу; при этом щуп 0,04 мм не должен проходить в зазор. Кроме того, специальным шагомером проверяют шаги лопаток. У лопаток, устанавливаемых с разворотом, специальным угловым шаблоном проверяют угол установки. При наличии выступов между хвостами лопаток и поверхностью корпуса или обоймы, либо между лопатками, их необходимо припилить до получения плавного бесступенчатого перехода. В особенности недопустимы выступы против потока. По потоку пороги допускаются, но не свыше 0,1 мм. При наличии скрепляющей проволоки ее заводят в имеющиеся для этого пазы и отверстия при наборке лопаток.

Поверхности концевых лопаток (вставок) у горизонтального разъема должны совпадать с плоскостью горизонтального разъема. Шаги должны быть выдержаны в соответствии с чертежом. Если лопатка или вставка выступает над горизонтальным разъемом, то производится их пригонка, за счет уменьшения толщины соседних лопаток, шлифовкой или припилов-

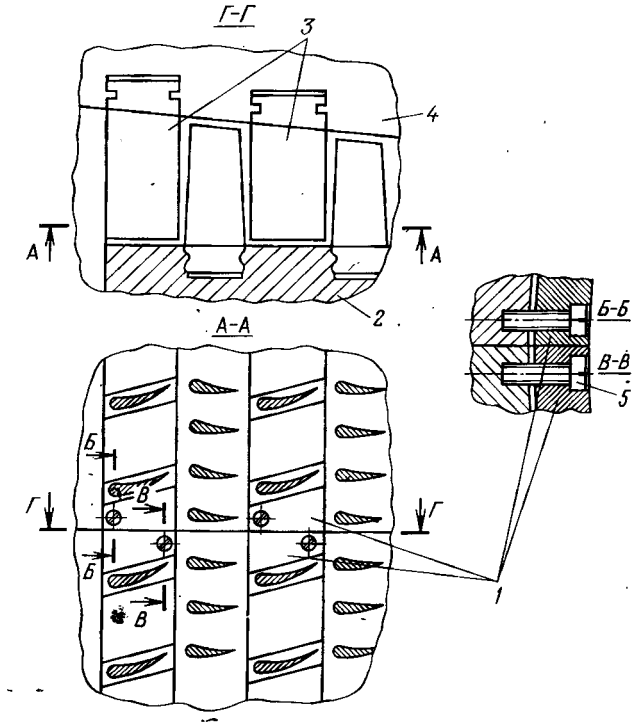


Рис. 80. Направляющие лопатки и их крепление у горизонтального разъема корпуса:

1 — замковые вставки; *2* — ротор; *3* — направляющие лопатки; *4* — корпус; *5* — винты для закрепления замковых вставок

кой, в пределах допуска на шаг. Если лопатка или вставка утопает, то соседние лопатки необходимо заменить на утолщенные. Во всех случаях должны быть получены чертежные размеры шагов. Торцы лопаток шлифуют в собранном корпусе. После обработки корпус разбирают и производят зачистку заусенцев, образовавшихся на лопатках в процессе шлифования.

После окончательной установки лопаток и закрепления их на диске производится установка бандажей ступени. Эта операция заключается в том, что лопатки связываются между собой бандажной лентой, которая надевается на головки лопаток и удерживается путем расклепывания шипов. Бандажной лентой

связывают лопатки по-пакетно. Количество лопаток в пакете указывается на чертеже и колеблется от 5 до 20. Наличие бандажа придает пакету лопаток необходимую жесткость против вибрации и вместе с этим ограничивает по высоте лопаток каналы для прохода пара. Перед разметкой бандажей положение лопаток должно быть проверено. Если в ступени окажутся лопатки, изменившие свое первоначальное тангенциальное и аксиальное положения больше, чем это допускается чертежом, то их следует отрихтовать и установить правильно.

Типы бандажей показаны на рис. 81. Бандажи типа *а* и *в* изготовляются из кольцевых поковок и на облопачивание подаются с припусками по ширине, длине и уплотнительным усикам, которые обрабатываются по окончательным размерам после

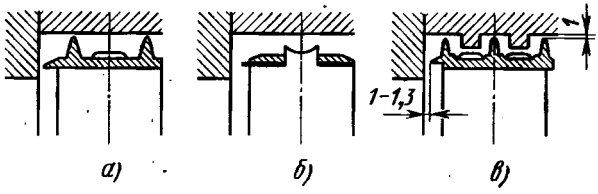


Рис. 81. Типы бандажей

облопачивания. Бандажи типа *б* изготовляются из листовой или полосовой нержавеющей стали. Ниже рассматривается процесс установки бандажей типа *б*.

При установке бандажей необходимо выдержать следующие требования: 1) бандажный сегмент должен надеваться на шипы лопаток без приложения значительных усилий; при надевании бандажа не должно происходить перегибания лопаток; 2) бандажи должны плотно прилегать к торцу лопаток; зазор может быть допущен не более 0,1 мм; 3) зазоры между бандажами должны точно соответствовать зазорам, указанным на чертеже (1—1,5 мм). Должна быть выдержана также установленная величина свисания бандажа над замком и над лопатками другого пакета. Если эта величина больше допустимой, то кромки лопаток запиливают по высоте до получения зазора между бандажом и кромками, равного 0,5—1 мм. Наличие указанного зазора обязательно для пакетов, подвергающихся вибрационной настройке.

Процесс изготовления бандажа заключается в следующем. Из стального листа вырезают полосы, имеющие припуск по ширине от 1,5 до 2 мм на сторону и по длине до 5 мм. Эти полосы изгибают по дуге, соответствующей положению шипов на диске, и размечают, нанося риски, соответствующие расположению шипов.

Разметка бандажного сегмента показана на рис. 82. На бандаже и на крайней лопатке клеймится номер пакета. Затем бандаж выпрямляется и на эксцентриковом прессе в нем пробивают отверстия (рис. 83).

После пробивки отверстий в бандаже опиливают фаски, и бандаж передается на шлифовку, полировку и кислотные испытания. После испытаний бандажи надевают на шипы лопаток и обрабатывают по длине до необходимых зазоров между соседними бандажами.

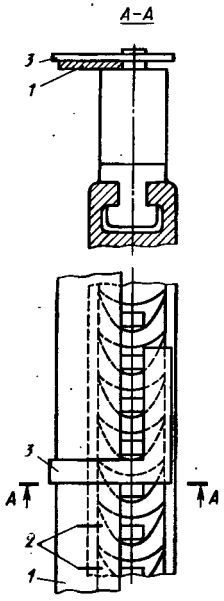


Рис. 82. Схема разметки бандажного сегмента:

1 — сегмент бандажной ленты; *2* — риска, соответствующая расположению шипа; *3* — угольник

Для установки бандажей на рабочих лопатках с косыми головками необходимо:

а) проверить радиальное и аксиальное положения лопаток и произвести правку их по мере надобности;

б) пронумеровать ленточные бандажи;

в) заготовить из тонкого картона или плотной бумаги шаблоны бандажей по числу пакетов и пронумеровать их;

г) окрасить головки шипов лазурью;

д) наложить поочередно бумажные шаблоны на соответствующие номера пакетов и снять отпечатки шипов лопаток;

е) перевести расположение шипов с бумажных шаблонов на бандажи и накернить центры отверстий под сверление;

ж) просверлить бандажи по разметке и зенковать их с двух сторон;

з) выгнуть бандажи и подогнать по шипам лопаток и по длине согласно чертежу; снять фаски с наружной стороны;

и) разогнуть бандажи и передать их на шлифовку, полировку и кислотное испытание;

к) надеть бандажи на шипы лопаток, проверить прилегание торцов лопаток к бандажам и, в случае надобности, произвести припиловку торцов лопаток до получения зазоров не более 0,1 мм; спилить кромки лопаток, перекрываемые соседним бандажом до зазора 0,5—1 мм; поставить окончательно бандажи и предъявить контролеру ОТК;

л) расчеканить шипы лопаток;

м) зачистить бандажи после клепки и предъявить собранный диск контролеру ОТК.

Расчеканка шипов производится при помощи молотка массой 500—600 г. При этом на очень тонкие лопатки, длиной более 100 мм, для уменьшения вибрации, отскакивания молотка и возможного прогиба лопаток необходимо укладывать мешки, набитые песком.

Пайка скрепляющей проволоки является завершающей операцией процесса облопачивания и производится серебряным припоем. Для пайки применяется серебряный припой ПСр 45 по ГОСТу 8190—56, имеющий следующий состав в %: серебро — 45 ± 0,5; медь — 30 ± 0,5; цинк — $25^{+1,0}_{-1,5}$

Проволока, как было указано выше, полируется под пайку. Нагрев под пайку производится ацетилено-кислородным пламенем сварочной горелки. Место пайки прогревается до темпера-

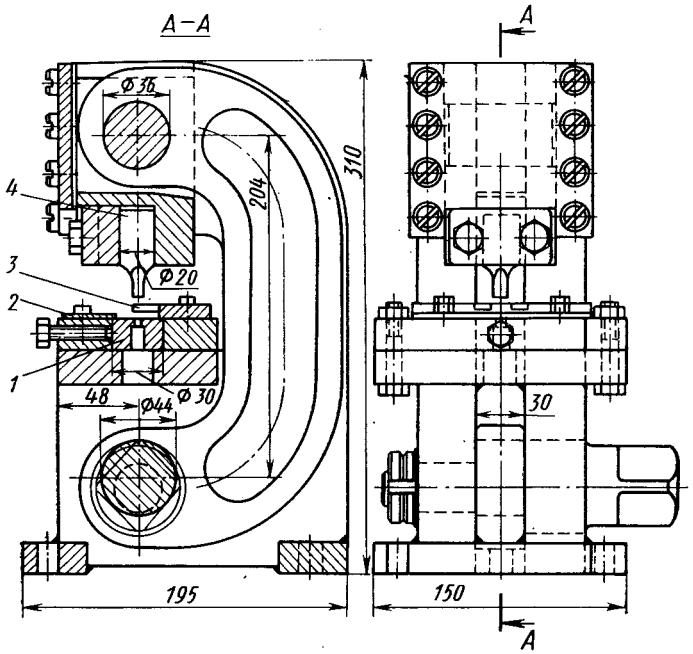


Рис. 83. Портативный пресс для пробивки отверстий для шипов лопаток в бандажных лентах:

1 — матрица штампа; *2* — передняя направляющая планка; *3* — направляющая планка со съемником; *4* — пуансон

туры 700—710° С. Для пайки употребляется флюс (хлористый калий — 43%, борная кислота — 57%). Покрывая пленкой место пайки, флюс препятствует проникновению в шов кислорода и тем самым предохраняет его от окисления.

При очень близком расположении лопаток пайку следует вести через одну лопатку, чтобы не вызывать перегрева соседней лопатки и большого расширения скрепляющей проволоки. При остывании проволоки возможно искривление лопаток и образование дополнительных напряжений в местах пайки. Для предупреждения перегрева целесообразно паять лопатки то в

одном, то в другом пакете. Расплавленный припой должен охватывать всю цилиндрическую поверхность проволоки и отверстия лопатки. После пайки флюс смывается струей пара или горячей водой. Собранный диск передается в сборочный цех на статическую балансировку и сборку с ротором.

Глава IX. ДИСКИ ТУРБИН

1. Назначение и условия работы

Диски определяют требуемое положение рабочих лопаток на роторе и в лопаточном аппарате турбины, выполняя функцию промежуточного звена между валом ротора и лопаточным аппаратом; диски непосредственно участвуют в преобразовании прямолинейного движения пара во вращательное движение турбинного ротора. По своему назначению и условиям эксплуатации диски являются наиболее напряженными и ответственными деталями ротора турбины. После сборки с лопатками диски называют также рабочими колесами.

При работе турбины насадное рабочее колесо (диск) находится в весьма сложных температурных и напряженных условиях. На диск воздействуют: силы, создаваемые давлением пара на лопатки; центробежные силы от лопаток и собственной массы; силы, вызываемые натягом от горячей посадки; силы, возникающие от разности давлений до диска и за ним; динамические нагрузки от вибрационных явлений; термические напряжения при пуске, переменных режимах работы турбины и др.

Наибольшие напряжения в материале работающего рабочего колеса возникают в зоне втулочного отверстия, однако, по условиям металлургического производства, именно возле центра втулочного отверстия, совпадающего с центром слитка, материал поковки диска имеет более низкие механические свойства, чем в остальной части поковки. Поэтому образцы для контрольных испытаний материала поковки всегда берутся из припуска, оставляемого на поверхности втулочного отверстия.

Диск турбины является почти столь же напряженной деталью, как и рабочие лопатки. Разрушение диска представляет собой серьезнейшую аварию и связано, обычно, с полным разрушением турбины. Поэтому к материалу дисков и качеству их обработки предъявляются очень высокие требования.

Совершенно недопустимы в дисках резкие конструктивные переходы, грубые следы резца после механической обработки и другие дефекты, могущие вызвать местную концентрацию напряжений. Известны случаи, когда поломки дисков происходили еще в процессе сборки ротора. При этом разрушение начиналось от угла осевого шпоночного паза. Причиной таких

поломок явилось то, что величина местного напряжения от натяга при горячей посадке оказалась значительно больше допустимой. Таким образом, здесь образовывалась концентрация напряжений, вызванная отсутствием закругления (плавного перехода) в углу шпоночного паза. В рассмотренных случаях предусмотренное чертежами закругление повреждалось напильником при слесарной доводке ширины шпоночного паза. При этом, как показала проверка, качество материала дисков было безупречным.

2. Конструкции дисков и их технологичность

В большинстве конструкций дисков можно различить следующие элементы: обод (или венец диска), втулку (или ступицу) и среднюю часть (или тело диска), называемую в произ-

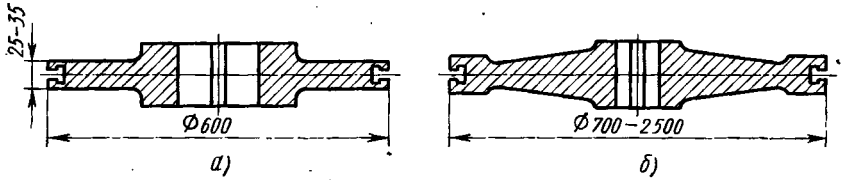


Рис. 84. Профили тел дисков

водственной практике полотном. Иногда под словом «венец» понимают профиль обода под насадку лопаток, например при грибовидном или вильчатом профилях.

В некоторых конструкциях дисков при небольшой ширине лопаток обод не отличается по толщине от примыкающего к нему полотна. Размеры обода целиком определяются размерами хвостов лопаток. Размеры втулки определяются величиной возникающих в ней напряжений, для снижения которых приходится увеличивать как длину, так и наружный диаметр втулки.

По своей форме диски представляют собой тела вращения Конструкция дисков, с точки зрения обеспечения требований технологичности, является в основном удовлетворительной.

Специфическими элементами формы дисков, которые влияют на технологию их изготовления, являются профили тел дисков и пазы в ободах (венцах) дисков для крепления лопаток. По форме этих элементов диски можно разделить на простые и сложные.

На рис. 84, *а* показано простое по форме тело диска, не вызывающее каких-либо трудностей при его обработке. Профили дисков, приведенных на рис. 84, *б* и на рис. 85, также относительно просты, но для обработки конических поверхностей указанных дисков требуется наличие специальных приспособлений. Диски с профильными кривыми (рис. 86, *а*) являются бо-

лее сложными; для их изготовления применяют специальные инструменты и приспособления, которые по своей конструкции являются весьма разнообразными. Технология обработки таких дисков и конструкции применяемой оснастки в значительной

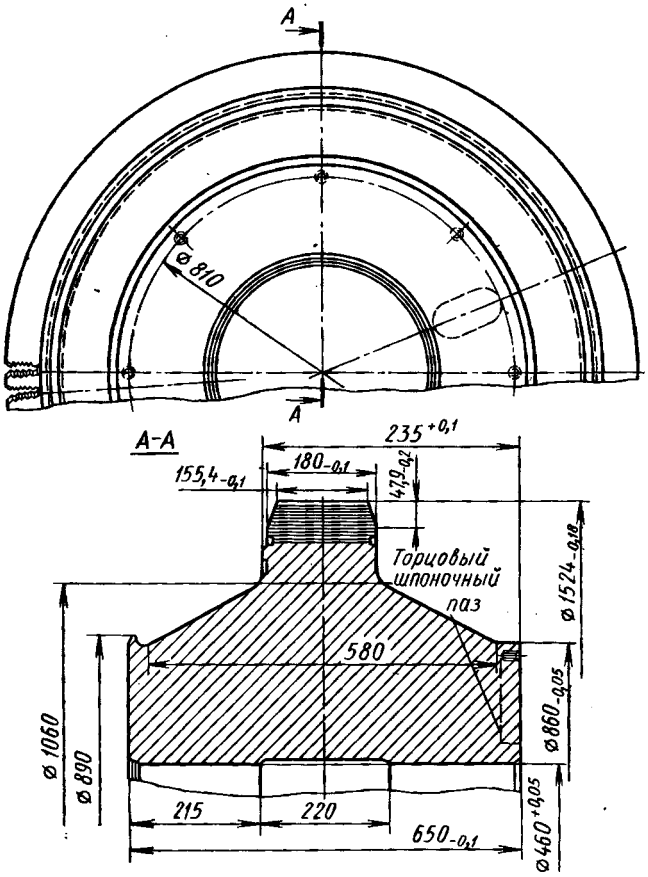
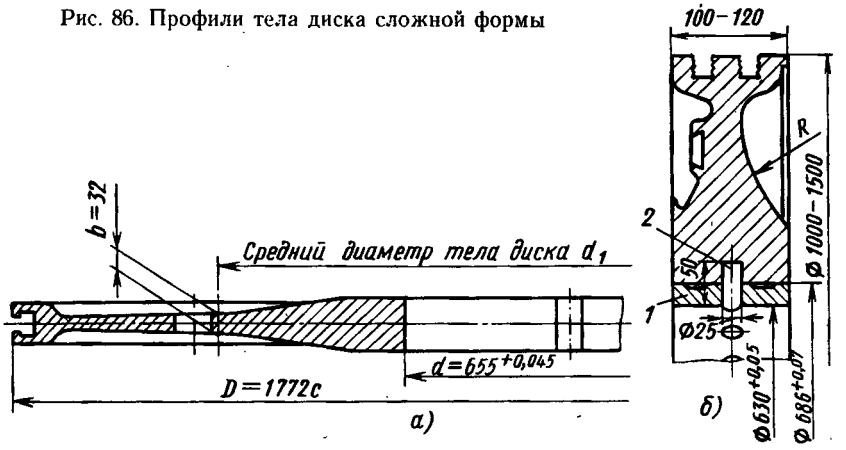


Рис. 85. Диск турбины большой мощности

степени зависят от количества деталей в партии, т. е. от серийности производства дисков. Подробное описание технологии обработки дисков с пальцевыми втулками (рис. 86, *б*) имеется в специальной литературе [4].

Существует большое количество конструкций пазов и венцов для крепления рабочих лопаток, однако по методу обработки их можно свести к сравнительно небольшому числу типов. Обработка пазов в дисках является наиболее сложной и ответственной частью работы, так как иногда даже незначительные отклонения влекут за собой брак всего диска. Для обработки

Рис. 86. Профили тела диска сложной формы



пазов применяют разнообразные профильные режущие и измерительные инструменты, весьма сложные в изготовлении.

Способы обработки рабочих колес сводятся к нескольким типовым технологическим процессам, описание которых дается ниже.

3. Применяемые материалы, виды заготовок и их испытания

Турбинные диски изготовляются из поковок углеродистой и легированной стали. Процесс изготовления поковок должен обеспечить однородную структуру и высокие механические свойства материала заготовок для дисков. Ось заготовки должна приблизительно совпадать с осью слитка. Внешние очертания поковок приблизительно соответствуют наружным очертаниям дисков с учетом припусков и напусков на обработку. Величина припусков на поковки зависит от размеров и формы дисков (рис. 87).

В местах сложных очертаний заготовкам придают упрощенную форму, т. е. делают напуск.

Стали, применяемые для изготовления турбинных дисков, разделяются на категории, которые определяются величиной напряжения, допускаемого в материале дисков во время работы турбины, а также техническими условиями на материал для дисков (см. ОТУ.24.10.003—68 и табл. 14, 15).

Технические требования к материалу дисков предусматривают высокую механическую прочность, чистоту металла и его однородность, отсутствие внутренних пороков и высокую химическую стойкость, а также хорошую обрабатываемость резанием для получения гладкой поверхности в готовом диске.

В кузнечно-прессовом цехе поковки проходят следующую обработку. Поковки отжигаются при температуре 700—750° С и медленно охлаждаются в печи. После отжига поковки поступают в обдирочное отделение, где их сначала грубо обрабатывают, оставляя припуски по 10—12 мм на сторону, и полируют поверхности отверстий и торцов ступицы и обода. Полирован-

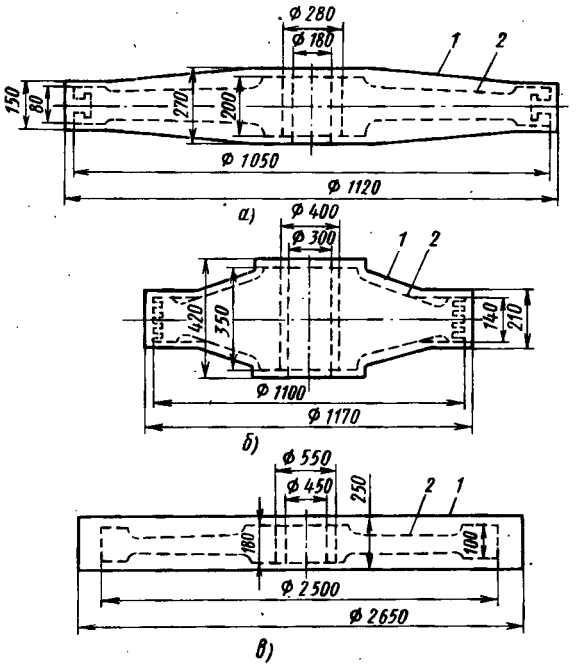


Рис. 87. Внешнее очертание заготовок для дисков:
а, б — заготовки для дисков сложных очертаний; *в* — заготовка для дисков простых очертаний; *1* — контур заготовки; *2* — контур готового диска

ные поверхности травят для выявления внутренних трещин типа флокенов.

При положительных результатах проверки, т. е. при отсутствии дефектов в материале заготовок, диски вновь обрабатывают резанием, оставляя припуски уже по 4—8 мм на сторону, в зависимости от формы и размеров дисков, и производят термическую обработку заготовок. Термической обработкой придаются дискам требуемые свойства и снимаются внутренние напряжения, которые возникают в процессе ковки и последующей обдирки. В зависимости от марок и сортов стали термическая обработка поковок заключается или в нормализации, или в закалке в масле с последующим отпуском и охлаждением на воздухе, или в закале в масле с отпуском и охлаждением в

печи. Режимы термической обработки указываются в технической документации на изделие.

Ответственное назначение и высокие требования к качеству турбинных дисков вызывают необходимость проведения следующих испытаний материала заготовок: определение величины внутренних напряжений; механических свойств металла; отсутствия флокенов, серных и фосфорных включений, внутренних трещин и других дефектов. Все эти испытания проводятся перед окончательной механической обработкой дисков.

Внутренние (тангенциальные) напряжения во многих случаях могут значительно ослабить механическую прочность турбинных дисков даже при отсутствии местной концентрации напряжений. Внутренние напряжения в поковках дисков возникают при горячей механической, термической и холодной механической обработках. В основу определения этих напряжений положена деформация образцов (колец), вырезанных из тела втулки диска.

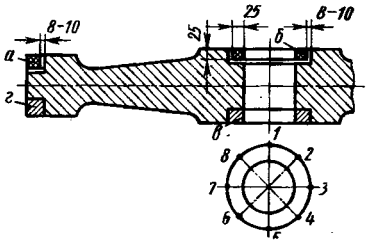


Рис. 88. Схема вырезки образцов (колец) для испытания материала и определения внутренних напряжений в заготовке диска

Операция вырезки и измерений колец выполняется следующим образом.

1. Поверхности поковки (рис. 88) в тех местах, где будут вырезаны кольца *а — г*, обрабатываются и полируются до 8-го класса чистоты. Такая обработка обеспечит точность измерений диаметра.

2. Окружность полированной поверхности колец делят на восемь равных частей и через намеченные точки в радиальном направлении проводят риски *1—8*. Риски определяют положения четырех диаметров, которые тщательно измеряют, и результаты измерения записывают.

3. Размечают ширину и толщину колец (25 × 25 мм).

4. Отрезают кольца с малой подачей (0,05—0,1 мм/об) и малой скоростью резания (8—10 м/мин) при обильном охлаждении. Такой режим не вызывает дополнительных напряжений при механической обработке.

Отрезанные кольца осторожно отделяют от детали и кладут на торцы с целью предупреждения образования деформаций от собственного веса колец.

После охлаждения кольца до температуры окружающего воздуха производится повторный обмер тех же диаметров. Повторные обмеры должны выполняться тем же работником, который производил предварительные обмеры, одним и тем же измерительным инструментом. Допускаемая ошибка обмера не должна превышать 0,01 мм.

Величина деформации определяется как разность диаметров колец до и после их вырезки. Величины внутренних напряжений определяются по упрощенной формуле

$$\sigma_t = \frac{E\delta}{D_{ср}},$$

где σ_t — тангенциальные напряжения в Н/мм² (кгс/мм²);
E — модуль Юнга; $E = 2 \cdot 10^5$ Н/мм² ($2 \cdot 10^4$ кгс/мм²);
δ — среднее приращение диаметра кольца в мм;
$D_{ср}$ — среднее значение замеров диаметров до отрезки кольца в мм.

Ниже приведен пример подсчета внутренних напряжений диска турбины мощностью 50 тыс. кВт. Результаты обмера кольца до и после отрезки приведены в табл. 13. Имеем $D_{ср} = 580{,}06$ мм; $\delta_{ср} = -0{,}025$ мм; отсюда

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0{,}025}{580{,}06} = 9 \text{ Н/мм}^2 \ (0{,}9 \text{ кгс/мм}^2).$$

Таблица 13

Результаты обмера кольца до и после отрезки

Обозначение диаметров по рис. 88	Замеры диаметров до отрезки кольца в мм	Замеры диаметров после отрезки кольца в мм	Деформация кольца в мм
1—5	580,77	580,06	—0,01
2—6	580,06	580,06	—0,00
3—7	580,05	580,01	—0,04
4—8	580,06	580,01	—0,05
Среднее значение	580,06	580,035	—0,025

Остаточные напряжения для дисков с наружным диаметром до 550 мм должны быть не более 30 Н/мм² (3 кгс/мм²); для дисков диаметром 550—1000 мм не более 40 Н/мм² (4 кгс/мм²); для дисков больших 1000 мм — не более 50 Н/мм² (5 кгс/мм²).

Механические свойства определяют испытанием пятикратных тангенциальных образцов. Пробы, из которых изготовляют образцы для испытания, вырезают холодным способом из термически обработанных поковок (рис. 89). Пробы *1* и *2* берут в кузнечно-прессовых цехах, а пробы *3—4* — в механических цехах для повторных испытаний перед окончательной обработкой дисков. У поковок для дисков диаметром свыше 1200 мм (рис. 89, *а*) пробы берут от ступицы и от обода, а у поковок для дисков диаметром до 1200 мм (рис. 89, *б*, *в*) — только от ступицы. Пробы клеймятся представителем технического контроля. Из каждой пробы изготовляют два образца на удар и по одному образцу на разрыв и изгиб. Испытание образцов производится в Центральной заводской лаборатории (ЦЗЛ).

Поковки, не удовлетворяющие требованиям технических условий, подвергаются повторным испытаниям на удвоенном количестве образцов. При этом повторяется тот вид испытания, который дал неудовлетворительные результаты. При отрицательных результатах повторных испытаний хотя бы одного образца, поковки подвергаются вторичной термической обработке.

Материал диска дважды подвергается травлению: первый раз при обдирке и второй раз перед окончательной механической обработкой. Гравлением выявляются скрытые пороки металла.

Окончательно обработанные диски испытывают снятием отпечатков по методу Баумана. Испытание выявляет серные и фосфорные включения в металле. Места, с которых снимают отпечатки, предварительно шлифуют. Отпечатки снимают с поверхности отверстия и двух торцов ступицы диска. Окончательно обработанные диски испытывают также методами дефектоскопии: на магнитной машине, магнитно-керосиновой пробой, ультразвуковым и другими методами. Эти испытания должны выявить внутренние дефекты (флокены, трещины и т. п.) [4].

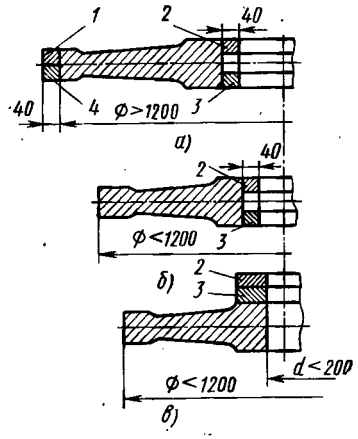


Рис. 89. Схема разметки диска для отбора образцов: *а* — диск диаметром больше 1200 мм; *б*, *в* — диски диаметром меньше 1200 мм

4. Основные технические требования, предъявляемые к механической обработке дисков

К механической обработке и статической уравновешенности дисков предъявляются высокие требования. Допуски на размеры дисков устанавливают по второму и третьему классам точности.

Обработанные турбинные диски должны удовлетворять следующим техническим условиям:

а) чистота поверхности отверстий должна быть 7-го класса; овальность и конусность отверстий дисков не должны выходить за пределы половины допуска на их диаметр;

б) неконцентричность отверстия и наибольшей наружной поверхности обода, а также неконцентричность других цилиндрических поверхностей допускается не более 0,03 мм; биение торцов обода относительно оси отверстия — не более 0,04—0,1 мм, в зависимости от размеров его диаметра;

в) упорный торец ступицы диска и отверстие обрабатываются с одного установа; отклонение от перпендикулярности торца

ступицы к оси отверстия не должно превышать 0,01 мм на всей длине;

г) непараллельность осей пазов или венцов для крепления лопаток допускается не более 0,15 мм на 100 мм длины;

д) непараллельность боковых поверхностей шпоночного паза относительно оси диска допускается не более 0,04 мм на всей его длине;

е) отклонение продольной оси шпоночных пазов от оси отверстия должно быть не более 0,02 мм (при двух шпоночных пазах, диаметрально расположенных в отверстии диска).

5. Типовые технологические процессы механической обработки дисков

На окончательную обработку после обдирки и термической обработки диски поступают с припуском 5 мм на сторону, кроме отверстия, в котором имеется припуск для пробы *3* (рис. 89, *а*, *б*). Диски диаметром более 1200 мм имеют еще и припуск *4* (рис. 89, *б*) на наружном диаметре обода. Механическая обработка диска начинается с вырезки кольцевых проб *3* и *4* для проведения испытаний. Дальнейшая обработка разрешается только при положительных результатах испытаний.

Основные методы обработки дисков различных конструкций мало чем отличаются друг от друга. Несколько различается обработка пазов, венцов и профильных кривых. Диски обрабатывают на токарно-карусельных, лобовых и токарно-центровых станках, а также на лобовых станках с гидро- или электрокопировальными устройствами, специально предназначенных для обработки дисков. С точки зрения повышения производительности и удобства обработки, отверстие и профильные кривые тела диска целесообразно обрабатывать на токарно-карусельных станках, а пазы или венцы для крепления лопаток — на лобовых.

Перед окончательной механической обработкой дисков поверхности отверстия и торцов ступицы и обода проверяют на отсутствие флокенов. Перед проверкой их обрабатывают по 9-му классу чистоты. Диск устанавливают на планшайбе карусельного станка и крепят кулаками за обод. Поверхности торцов обрабатывают резцами, оснащенными пластинками из твердого сплава марки Т15К6 (ГОСТ 3882—67) или из минералокерамических сплавов, с последующей зачисткой наждачным полотном. Отверстие диска обрабатывают расточным резцом и шлифуют при помощи шлифовального приспособления, которое устанавливают на суппорте станка вместо резцедержателя. Это дает возможность обрабатывать оба торца с одной установки. При креплении диска кулаки необходимо прижимать равномерно и с большой осторожностью, не допуская коробления диска. Рекомендуется на торец ступицы устанавливать два-три индикатора.

Величина отклонения допускается не более 0,01—0,02 мм. Такая установка и крепление жестких дисков в кулаках за обод, при соблюдении указанных условий, не вызывают деформаций, влияющих на точность формы дисков.

Отверстие в диске растачивают с припуском 0,5—0,6 мм на диаметр и с одной установки окончательно обрабатывают с двух сторон торцы ступицы (рис. 90). Такой способ обработки гарантирует требуемую параллельность торцов. После этого обрабатывают торец обода и цилиндрическую наружную поверхность его до кулаков планшайбы. На торце обода для дальнейшей обработки пазов или венцов оставляют припуски 0,2—0,3 мм на сторону, а по наружному диаметру 0,5—1,0 мм на сторону. Затем специальным приспособлением шлифуют отверстие. Мощность электромотора шлифовального приспособления не должна быть ниже 4—5 кВт. Затем с этой же установки обрабатывают профильную кривую тела диска.

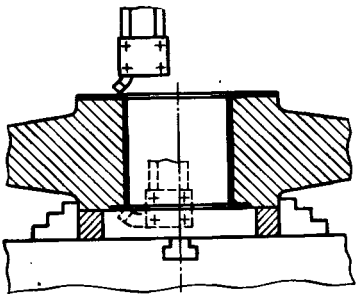


Рис. 90. Схема установки диска под окончательное точение ступицы на карусельном станке

Обработка второй стороны диска должна обеспечить равномерное распределение его массы относительно оси. Такая уравновешенность достигается строгой концентричностью отверстия и обода и параллельностью сторон диска. С этой целью для обработки второй стороны диска на карусельных станках применяется «установка на столбики», показанная на рис. 91, *а*. Расположение столбиков *5* на планшайбе *1* карусельного станка показано на рис. 91, *б*.

Столбики представляют собой цилиндрические детали с заточкой у основания, выполненной по размеру паза планшайбы, и центральным отверстием для их крепления. После крепления на планшайбе все столбики одновременно обтачивают, чем обеспечивается абсолютное равенство их по высоте. Диск *4*, установленный на столбики торцом обода, проточенным при обработке первой стороны, занимает правильное положение (без биения) в осевом направлении. В радиальном направлении диск выверяется по индикатору *3* с помощью кулачков *2*. Точность выверки — до 0,01 мм.

Обработка профильных кривых. Профильные кривые на телах дисков имеют весьма разнообразные формы — от простых до сложных. На одной и той же поверхности диска профиль может состоять из нескольких участков кривых большей или меньшей протяженности (см. рис. 85 и 86).

Для обработки кривых поверхностей дисков применяют различные методы.

Галтели, находящиеся у ступиц и ободов дисков и имеющие небольшую протяженность, а также расположенные у пазов для уравновешивающих грузов, обрабатывают фасонными жесткими или пружинными резцами.

Для обработки профильных кривых дисков турбин станкоинструментальной промышленностью созданы специальные копировальные станки с электрическим, гидравлическим или пневматическим управлением. Однако применение их оказалось целе-

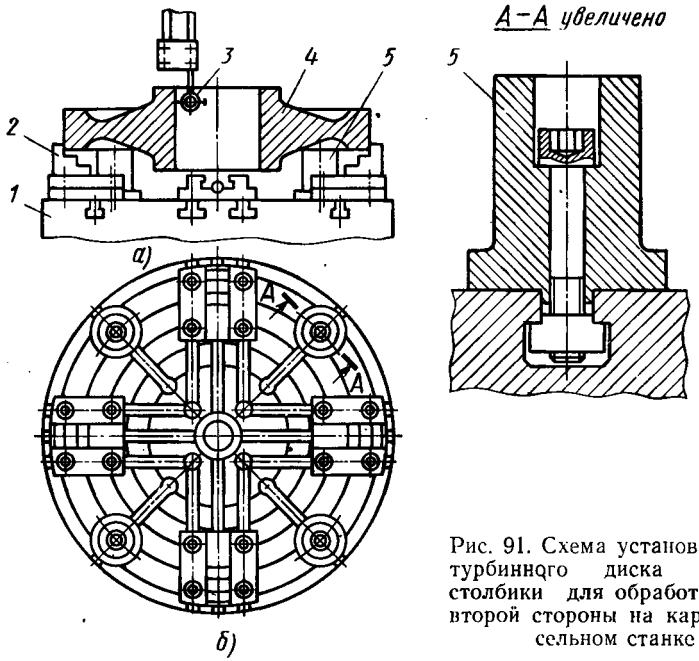


Рис. 91. Схема установки турбинного диска на столбики для обработки второй стороны на карусельном станке

сообразным только на сложных профилях, типа показанных на рис. 86, *а*, и при крупных сериях выпускаемых турбин.

В мелкосерийном производстве более эффективной является обработка профильными резцами на обычных карусельных станках.

Суппорт для обработки конических поверхностей дисков (рис. 92) состоит из корпуса *3* с направляющими типа ласточкина хвоста и резцовой головкой. Настройка суппорта на угол производится по шаблону. Тяга *2* одним концом шарнирно связана с резцовой головкой *1*, перемещаемой по направляющим корпуса *3*, а другим — с резцедержателем бокового суппорта станка. При боковой подаче горизонтального суппорта тяга тянет за собой резцовую головку с резцом по направляющей, установленной наклонно. Для устранения возможности образования

продольного изгиба тяга работает на растяжение. Это приспособление дает хорошие результаты при обработке пологих конусов с длиной образующих не более 300 мм.

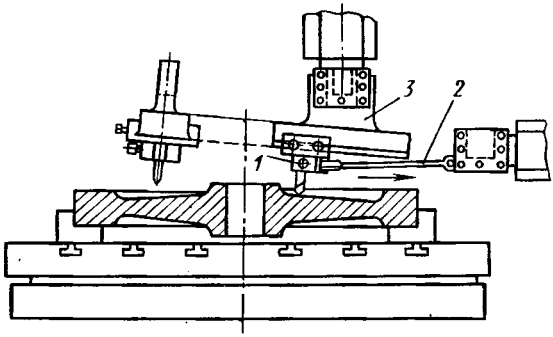


Рис. 92. Специальный суппорт для обработки конических поверхностей

Приспособление для обработки криволинейных поверхностей с большими радиусами кривизны показано на рис. 93. Настройка приспособления по величине радиуса кривой производится за счет изменения вылета резца. Расстояние от режущей кромки резца до оси вращения рычага с резцом

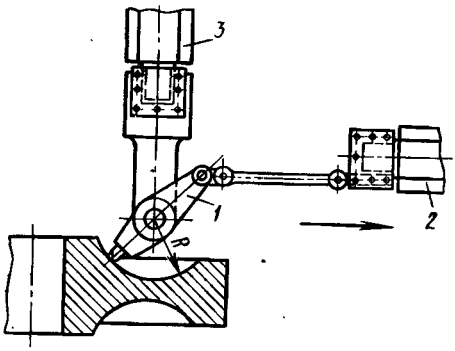


Рис. 93. Приспособление для обработки криволинейных поверхностей:
1 — рычаг; *2* — боковой суппорт; *3* — вертикальный суппорт

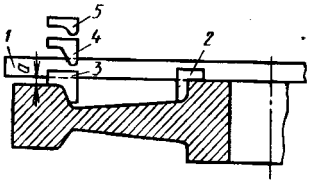


Рис. 94. Схема обработки профиля тела диска

устанавливают равным радиусу обрабатываемой кривой. Принцип работы этого приспособления и его установка ясны из рисунка без дополнительных пояснений.

Последовательность обработки профиля тела диска показана на рис. 94. Первоначально обрабатывают торец обода, выдерживая размер *a* от ступицы при помощи контрольной линейки *1* и предельной пластины. Возможно применение штихмаса или мерных плиток в зависимости от величины *a*. По шаблону *2* обрабатывают радиусный переход (галтель) от ступицы к телу

диска, по шаблонам *3* и *4* — переходную кривую на ободе и по шаблону *5* — галтель обода.

Для предварительной обработки галтелей применяют только жесткие резцы (рис. 95, *а* и *г*), а для окончательной обработки

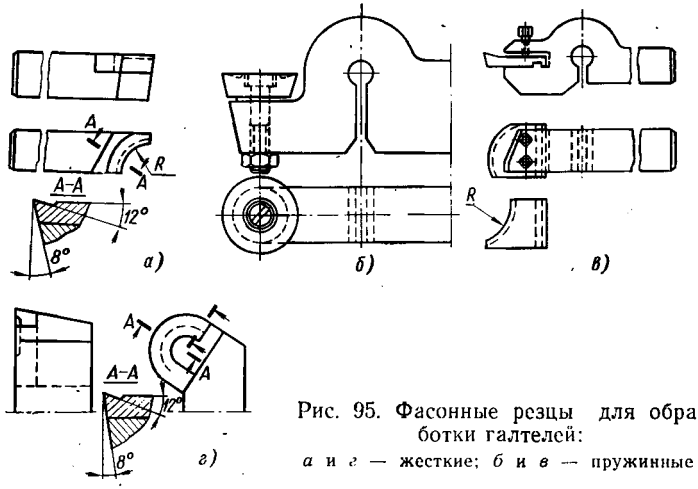


Рис. 95. Фасонные резцы для обработки галтелей:
а и *г* — жесткие; *б* и *в* — пружинные

при нежестких станках применяют резцы с пружинными оправками (рис. 95, *б* и *в*). Конические поверхности обрабатывают после галтелей. Плавность переходов от галтелей к конической поверхности обеспечивают правильной настройкой приспособления. Для дисков с конической поверхностью шаблон на полный профиль можно не изготовлять. Порядок обработки элементов кривой сложного профиля (см. рис. 86, *а*) в основном остается таким же, однако в этом случае необходимо применение шаблона на полный профиль.

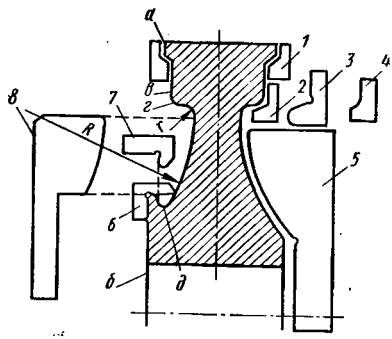


Рис. 96. Схема обработки криволинейных поверхностей тела диска

Обработка криволинейных поверхностей тела диска (рис. 96) также начинается с обработки торца обода *а*. При этом выдерживают заданный размер от торца *б* ступицы. Затем обрабатывают поверхность *в* и по шаблону *1* галтель бурта. Дальнейший порядок обработки соответствует номерам шаблонов *1—8*. Шаблоны *1—4* одинаковы для той и другой стороны. При больших размерах дисков конусную поверхность *г* до сопряжения ее с поверхностью радиуса *r* обрабатывают при помощи суппорта станка, повернув его на соответствующий угол, а поверхность радиуса *R* — при помощи специ-

ального приспособления. После этого по шаблону *6* врезаются до поверхности радиуса *R* и фасонным резцом по шаблону *7* обрабатывают канавку *д*. Обработку профиля тела диска заканчивают обточкой поверхности радиусом *R* при помощи описанного выше приспособления (см. рис. 93).

Обработка пазов и венцов. Последняя ответственная и наиболее сложная токарная операция — обработка пазов и венцов

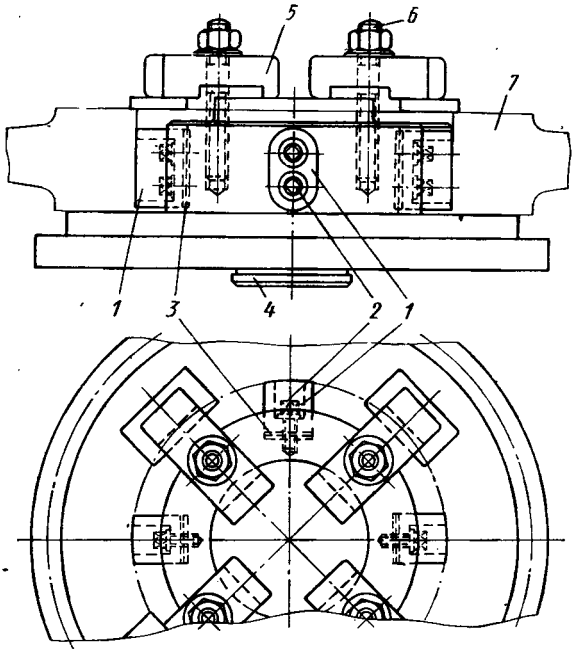


Рис. 97. Оправка для установки диска на станке

для закрепления рабочих лопаток — производится на токарно-лобовых станках, которые в данном случае являются наиболее подходящими как с точки зрения наибольшего удобства рабочему для наблюдения за обработкой паза, так и с точки зрения удаления стружки.

Для установки и закрепления дисков на лобовых станках применяют жесткие оправки, один из типов которых показан на рис. 97. Оправка состоит из четырех кулаков *1*, установленных в гнездах чугунного корпуса и закрепленных винтами *2*. Для настройки оправки на разные диаметры необходимо иметь несколько комплектов кулаков разной высоты. Регулирование диаметра оправки в пределах 5—20 мм осуществляется сменными пластинами *3*, которые прокладываются между основанием кулаков и корпусом оправки. В нижней части (у основания) оп-

равка имеет цилиндрический направляющий выступ *4*, который точно выполнен по центрирующей заточке планшайбы станка. К планшайбе фланец оправки крепится болтами. Шейку оправки под посадку диска точат после окончательного закрепления оправки на станке. Центрирующий выступ *4* обеспечивает концентричную установку оправки на планшайбе станка и предотвращает смещение оправки в радиальном направлении. Окончательную проверку диаметра кулаков производят проточкой их в соответствии с размером отверстия диска. Для посадки на оправку диск *7* без перекоса подвешивается на тросах подъемного крана и плавно заводится на оправку. При этом допускается некоторое смещение самой оправки. Диск окончательно крепится к оправке прижимными планками *5* и шпильками *6*.

К изготовлению пазов и венцов предъявляют исключительно высокие требования, что видно из рис. 23. Посадочные размеры профилей выполняются с допусками 0,03—0,05 мм. Измерительными базами для обработки профилей пазов и венцов являются наружные диаметры ободов дисков. Непременным условием высокой точности выполнения операции является полное отсутствие биения наружной поверхности обода как измерительной базы.

Ввиду того что при посадке диска на оправку не удается полностью избежать биения наружной поверхности, несмотря на высокое качество подготовки оправки, диски поступают на эту операцию с припуском по наружному диаметру 1—2 мм на сторону. После установки на оправку диск протачивают по наружному диаметру, добиваясь полного отсутствия радиального биения наружной поверхности обода.

Для примера на рис. 98 и 99 показана обработка Т-образного и вильчатого пазов. Последовательность переходов обработки паза (рис. 98) отмечена буквами *а* — *м*. Цифрами отмечены измерительные инструменты: *1*, *4*, *5*, *7* — предельные глубиномеры; *2*, *6*, *8* — предельные скобы; *3* — предельная пластина; *9* — шаблон для установки резца; *10—14* — профильные шаблоны. Для каждого из переходов требуется применение специального резца.

Для вильчатых венцов (см. рис. 24), изготовляемых с высокой степенью точности, допуски на размеры пазов устанавливаются в очень узких пределах. Кроме того, требуются строгая параллельность боковых поверхностей пазов и правильная прорезка глубоких пазов без увода резца.

Последовательность обработки пазов и применяемые при этом измерительные инструменты показаны на схеме рис. 99. На этом рисунке для чистовых переходов целесообразно применять резцы твердых сплавов марки Т15К6. Как видно из рассмотренных схем, последовательность обработки паза строится на основе постепенного приближения его профиля к заданным чертежным размерам и форме.

Последовательность обработки вильчатого паза согласуется с построением размерных цепей профиля. С обработкой грибовидных и зубчиковых профилей можно ознакомиться в специальной литературе.

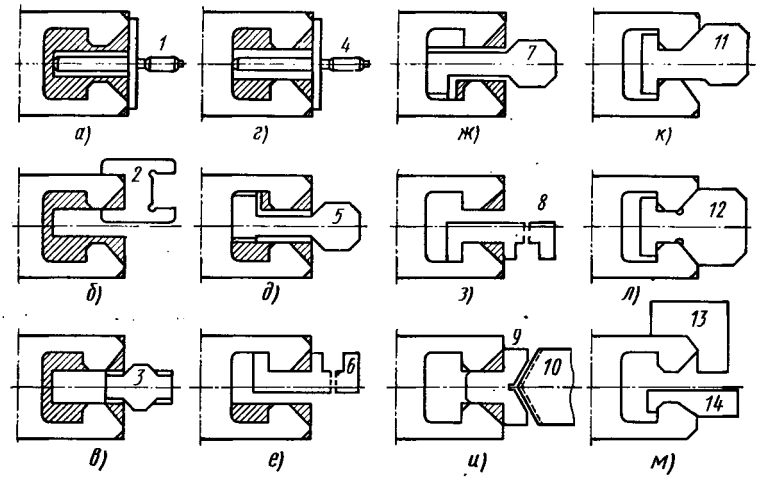


Рис. 98. Последовательность обработки Т-образных пазов в дисках

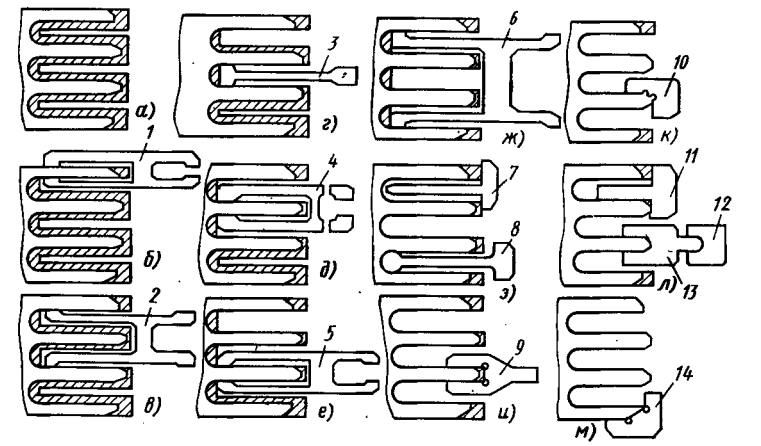


Рис. 99. Схема обработки пазов вильчатого венца диска:

а — м — последовательность переходов обработки; *1, 4, 5* — предельные скобы; *2, 3, 6* — предельные пластины; *7, 11* — глубиномеры; *8—10, 12—14* — шаблоны

На рис. 100 показаны профили пазов диска, изображенного на рис. 101, *а*, и профили хвостов лопаток, применяемых в мощных турбинах с высокими параметрами пара и с большими числами оборотов, типов МВ30, ВКТ100, ПВК150 и др.

Обработку пазов в дисках, выполненных заодно с валом, производят на горизонтально-расточном или вертикальном зубофрезерном станке, а в случае отдельных дисков — на модернизированных токарно-лобовых станках.

На рис. 101, *б* показана установка диска на модернизированном токарно-лобовом станке. Для поворота диска под обработку каждого следующего паза на суппорте станка смонтировано делительное приспособление. На планшайбе станка закреплена переходная втулка с фланцем для крепления сменных резцовых

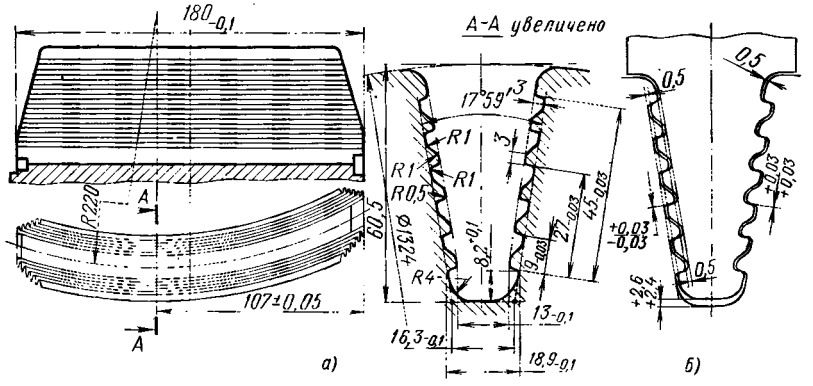


Рис. 100. Паз венца диска мощной турбины:
а — проекция паза; *б* — посадка лопатки

головок. Первой резцовой головкой производится предварительная прорезка всех пазов в виде ступенчатого профиля (рис. 101, *в*, поз. *1*) под дальнейшую разделку на конус. Затем устанавливается вторая головка, и все пазы прорезаются на конус (рис. 101, *в*, поз. *2*). Для окончательного профилирования пазов (рис. 101, *в*, поз. *3*) устанавливается третья головка с профильными зубчиковыми резцами. Более подробное описание устройства головок, резцов и схемы обработки, а также выверки положения головок относительно обрабатываемого диска, имеется в специальной литературе [4].

Обработка пароразгрузочных отверстий и отверстий для крепления лопаток. Пароразгрузочные отверстия располагают на теле диска, приблизительно на его среднем диаметре. Диаметры отверстий колеблются от 30 до 80 мм и зависят от диаметра дисков. Каждое отверстие с обеих сторон диска имеет галтели с радиусом от 2 до 15 мм. Радиус галтелей по всей окружности должен быть одинаков, независимо от уклона поверхности тела диска.

При изготовлении пароразгрузочных отверстий в дисках, имеющих коническую форму полотна (см. рис. 86, *а*), возникают трудности в выдерживании радиуса галтели одинаковой величи-

ны по всей окружности отверстия. Эти затруднения возрастают с увеличением уклона полотна (см., например, рис. 84, *б* и 87, *б*). Для удобства обработки диски такой формы следует устанавливать на универсальных поворотно-угловых столах или на конусных подставках так, чтобы образующая конуса расположилась

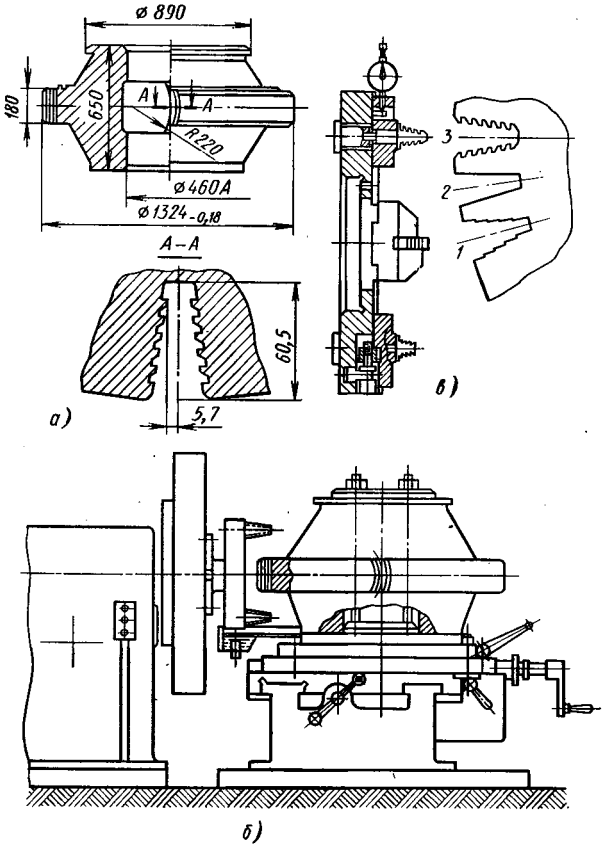


Рис. 101. Схема обработки елочного радиального паза на токарно-лобовом станке:

а — диск и профиль паза; *б* — установка диска на станке; *в* — специальный диск с резцовыми головками

горизонтально. Для обработки скруглений применяют специальные радиусные зенковки; при небольшой конусности полотна диска для этой цели применяют оправки с установкой зенковки на шарнире. Скорость резания для зенковок принимается не больше 3—4 м/мин. После зенкования поверхность скруглений полируют наждачным полотном с помощью деревянных оправок до получения чистоты поверхности 9-го класса.

Рабочие лопатки с вильчатыми хвостами закрепляются на ободе диска заклепками (рис. 102). В зависимости от размеров лопаток используются заклепки диаметром 4—20 мм. Предварительные отверстия под заклепки сверлятся до облопачивания диска с припуском 2 мм на диаметр. Расположение отверстий по шагу и в радиальном направлении необходимо выдерживать весьма точно, для чего сверление производят по накладным кондукторам с установленными в них кондукторными втулками. Обработку ведут на радиально-сверлильных станках. При единичном характере производства дисков сверление отверстий мо-

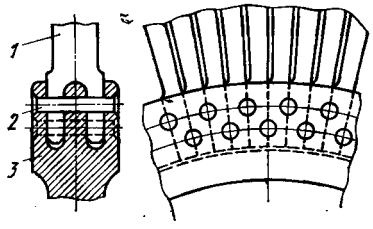


Рис. 102. Схема закрепления лопаток с вильчатым хвостом в пазах дисков:

1 — лопатка; *2* — заклепка; *3* — диск

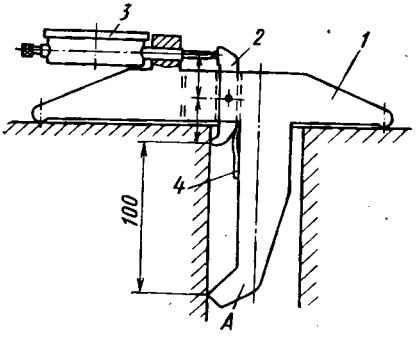


Рис. 103. Схема контроля перпендикулярности стенок шпоночных пазов к торцу ступицы

жет производиться без кондукторов, с использованием универсальных делительных приспособлений.

Обработка шпоночных пазов. Шпоночные пазы изготовляются долблением. Обработка ведется по разметке с припуском 0,1—0,3 мм на каждую боковую сторону паза; на глубину паза припуска не оставляют.

При наличии в диске нескольких пазов обеспечить их точное расположение обработкой по разметке трудно. В этих случаях целесообразно применять специальные шаблоны. Шаблон представляет собой кольцо, выполненное с центрирующим буртом по ступице диска толщиной 12—15 мм, с пазами, точно расположенными по окружности. Ширина паза в кольце делается на 1—2 мм больше размера паза в диске. Это необходимо для применения щупа при настройке резца. При установке шаблона на диск базой служит отверстие последнего. Точное расположение шпоночных пазов в диске после долбления достигается дополнительной слесарной обработкой.

Проверка перпендикулярности стенок пазов и торца ступицы в рабочих колесах осуществляется при помощи особого шаблона (рис. 103). Этот шаблон состоит из планки *1* с упором *A*,

равноплечего рычага *2*, микронного индикатора *3* и плоской пружины *4*. При помощи эталонного паза индикатор шаблона устанавливается на ноль. Для проверки рабочего паза шаблон устанавливают на торец диска и передвигают его до соприкосновения упора *А* с проверяемой стенкой паза. При касании упора *А* о стенку паза рычаг *2* под действием пружины также коснется контролируемой стенки, и стрелка индикатора покажет величину отклонения перекоса паза на 100 мм его длины.

6. Статическая балансировка

Для спокойной, без вибраций, работы ротора турбины центры тяжести дисков и других деталей, насаженных на вал, должны совпадать с его геометрической осью. Неоднородность металла, неточность при механической обработке и ряд других причин вызывают неравномерное распределение массы металла. Для уравновешивания производят статическую балансировку ротора, выполняемую на балансировочных параллелях. Уравновешивание турбинных дисков и методы их балансировки широко освещены в специальной литературе, поэтому здесь приводятся лишь некоторые практические приемы и отдельные замечания, непосредственно связанные со статической балансировкой турбинных дисков.

Статическая балансировка дисков производится дважды. Первая (предварительная) балансировка выполняется после механической обработки диска, перед наборкой лопаток на диск; вторая — (окончательная) — после наборки лопаток, перед посадкой уже облопаченных дисков (т. е. рабочих колес) на вал ротора. Некоторые заводы применяют еще одну балансировку до окончательного крепления набранных лопаток, заменяя этим развешивание лопаток по пакетам перед облопачиванием.

При первой балансировке неуравновешенность диска только определяется, но лишняя масса металла с диска не снимается, так как обычно она невелика. Места, с которых требуется снять лишний металл, маркируются с обозначением величины излишнего веса.

После посадки лопаток на диск разность веса отдельных лопаток, смещение их центра тяжести в радиальном направлении, смещение отдельных отрезков бандажной ленты и проволоки, а также другие причины, могут вызвать увеличение неуравновешенности до нескольких сот и даже тысяч грамм-сантиметров. В процессе окончательной балансировки неуравновешенность облопаченного диска должна быть полностью устранена.

Перед выполнением балансировки диска ножи балансировочных параллелей необходимо тщательно осмотреть. Они не должны иметь забоин, царапин, грязи и должны быть точно отнивелированы прецизионным уровнем.

Для балансировки каждый диск или рабочее колесо насаживается на специальную оправку (рис. 104, *а*). Шейки *4* у оправки должны быть чисто обработаны и иметь строго одинаковые диаметры. Шейки *5* служат для транспортирования оправки с наса-

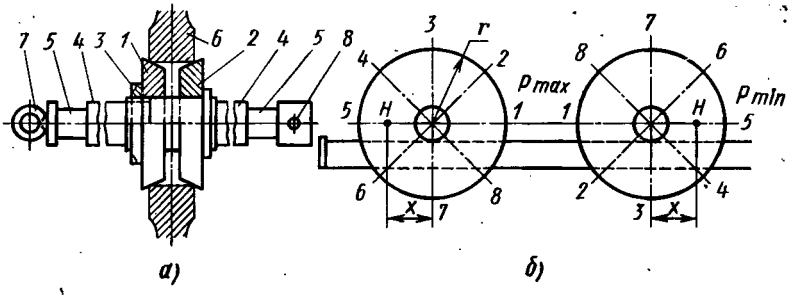


Рис. 104. Элементы статической балансировки:
а — оправка для балансировки дисков; *б* — схема установки диска для балансировки

женным диском *6*. Рым *7* и цапфы *8* необходимы для кантования оправки с насаженным диском и установки ее в вертикальное положение под насадку диска. Конические шайбы *1* и *2* плотно, с посадкой *Д*, пригоняются по диаметру оправки и после сборки с диском прижимаются гайкой *3*. Сама оправка после ее изготовления и сборки тщательно балансируется.

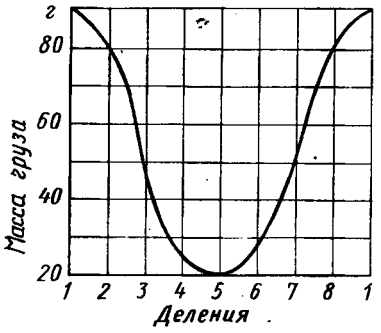


Рис. 105. График балансировки

При постановке диска на параллели в процессе балансировки возможны два случая.

Первый случай: диск под влиянием неуравновешенной массы прокатывается на параллелях некоторое расстояние, после чего останавливается, занимая вполне определенное положение. В этом случае наиболее тяжелое место явно выражено. Оно находится на радиусе, проходящем через диск вертикально, ниже оси диска.

Второй случай: диск, поставленный на параллели, не катится, оставаясь неподвижным в любом положении. Это означает, что проверяемый диск полностью уравновешен или момент неуравновешенной массы недостаточен для преодоления момента качения.

В первом случае требуется определить лишь величину неуравновешенной массы; во втором случае — и ее расположение и величину.

Рассмотрим подробнее второй случай.

Балансировка на параллелях состоит в следующем: диск, установленный на параллели, размечают мелом на восемь делений (рис. 104, *б*). К каждой из восьми отметок поочередно прикладывают такой груз, под влиянием которого диск может повернуться вправо на один и тот же угол. Результаты заносят на график (рис. 105). По графику легко определить тяжелое и легкое места диска: более легкое место будет там, где пришлось подвесить больший груз. Зная вес максимального и минимального грузов, не трудно определить величину груза, который надо добавить к легкому месту или снять с тяжелого места, чтобы диск был уравновешен. Для этого следует составить уравнение моментов, а именно:

$$P_{max}R - Hx = P_{min}R + Hx,$$

откуда

$$Hx = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} R,$$

или (согласно графику балансировки — рис. 105) уравновешивающий груз $У$, подвешиваемый на радиусе R, будет

$$У = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} = \frac{90 - 20}{2} = 35 \text{ г.}$$

Для уравновешивания массы диска обычно удаляют металл с внутренней части обода или эксцентричным стачиванием металла — с наружной поверхности ступицы.

Если уравновешивающий груз снимается с диска не на радиусе той окружности, по которой производилась балансировка и определялись величины грузов, то делают пересчет по формуле

$$X = \frac{PR}{r},$$

где X — искомый груз;

P — груз, определенный при балансировке;

R — радиус окружности диска, к которой прикладывались грузы при балансировке;

r — радиус окружности, на которой снимается металл.

После снятия нарушающей неуравновешенность рабочего колеса массы металла производят повторную контрольную балансировку с составлением новых графиков, определяющих величину уравновешивающего груза и его расположение. Если величина остаточной статической неуравновешенности не превышает допустимую, указанную в чертеже данного рабочего колеса, то балансировка считается законченной. Допустимой неуравновешенностью рабочего колеса обычно считается та-

кая, которая при нормальной частоте вращения детали дает неуравновешенную центробежную силу в 3—5% от веса балансируемой детали.

Допустимая неуравновешенность, отнесенная к радиусу R, определяется из уравнения

$$\frac{PR}{g}\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 = P_1\frac{4}{100}; \quad P = \frac{36P_1 g}{\pi^2 R n^2},$$

где P — масса, которая может быть оставлена неуравновешенной, в кг;

P_1 — масса балансируемой детали в кг;

n — частота вращения балансируемой детали в об/мин;

g — ускорение свободного падения;

R — радиус окружности, на которой снимается металл при балансировке детали.

По приведенной формуле производится также контроль выполнения статической балансировки.

7. Автофритирование турбинных дисков

При насадке дисков на вал применяются натяги, обеспечивающие плотную посадку как при нормальной, так и при разгонной частоте вращения ротора турбины, которая примерно на 10% выше рабочей.

Обычно величина натяга выбирается из такого условия, что освобождение диска на валу может произойти не ранее, чем при частоте вращения ротора на 12—20% большей рабочей частоты. Для этого приходится использовать большие натяги, которые вызывают значительные напряжения при посадке дисков на вал.

Например, в одном из дисков турбины с наружным диаметром диска в 1000 мм при диаметре втулочного отверстия 200 мм, для освобождения диска на валу при частоте вращения 3500 об/мин (рабочая частота вращения составляет 3000 об/мин) был выбран натяг в 0,224 мм, вызывающий напряжения при посадке на втулочном отверстии в 22,4 кН/см^2 (2240 кгс/см^2).

Для снижения чрезмерно больших напряжений от посадочных натягов завод применял автофритирование турбинных дисков. Сущность этого метода заключается в следующем. Если частота вращения диска начинает превышать такую, которая вызывает напряжение на втулочном отверстии равное пределу текучести материала, то в кольцевой части диска, примыкающей к втулочному отверстию, возникнут пластические деформации. При дальнейшем увеличении частоты вращения область пластической деформации будет распространяться в глубь диска

в радиальном направлении. Выше этой области, в направлении к периферии диска, там, где напряжения еще не достигнут предела текучести материала, деформации будут носить упругий характер. Если в этот момент прекратить вращение диска, т. е. снять нагрузку, то материал диска в зоне пластической деформации получит остаточную деформацию.

Кольцевая часть диска, находящаяся над зоной остаточных деформаций и имевшая при вращении диска (т. е. при нагрузке) упругую деформацию, будет сжимать внутреннюю деформированную зону и создавать в ней остаточные сжимающие напряжения. Описанный здесь процесс и называют автофритированием. Если подвергнутый автофритированию диск насадить на вал с натягом, то при вращении его с нормальной рабочей частотой возникающие напряжения будут иметь значительно меньшую величину за счет действия сжимающих напряжений, созданных при предварительном разгоне диска. При этом зона максимальных напряжений переместится в глубь диска и влияние концентрации напряжений от осевого шпоночного паза не будет столь значительным, как в диске, не подвергнутом автофритированию и имеющем максимальные напряжения во втулочном отверстии.

Применение автофритирования позволяет снизить рабочие напряжения в дисках и, как следствие этого, использовать для дисков материал меньшей прочности, уменьшить длину ступицы, повысить посадочные натяги.

Для автофритирования дисков применяется специальная установка, состоящая из консольного вала, опирающегося на два подшипника скольжения. На одной консоли вала находится одновенечное колесо приводной паровой турбинки, а на другой консоли монтируется подлежащий автофритированию диск. Специальная конструкция посадочной втулки под диском обеспечивает плотную посадку диска и при увеличении внутреннего отверстия диска при его разгоне. Для безопасности вся установка во время работы закрывается бронированным кожухом.

Механическая обработка автофритируемых дисков проходит в два приема: сначала диск обрабатывают под автофритирование с припусками по наружному диаметру и диаметру втулочного отверстия (по 1,5 мм) по толщине обода (1 мм) и по длине ступицы (0,5 мм). Т-образный паз для лопаток не точат. Затем, уже после автофритирования, все перечисленные припуски снимают, внутренний диаметр втулочного отверстия доводят до чертежного и протачивают пазы под лопатки.

Применение для автофритируемых дисков более дешевых марок сталей существенно снижает их стоимость. Каждая турбина имеет на роторе 10—15 дисков, поэтому суммарная экономия от применения для изготовления дисков более дешевых материалов достигает нескольких тысяч рублей.

1. Назначение и условия работы

В гл. VII были рассмотрены конструкции и условия работы роторов. Вал — основная и наиболее нагруженная деталь ротора.

На вал ротора турбины действуют: крутящий момент, соответствующий передаваемой турбиной мощности; изгибающий момент от собственного веса и веса насаженных на него деталей; силы неуравновешенного давления пара вдоль оси.

Тяжелые условия работы валов и большая ответственность их с точки зрения обеспечения надежности работы всей турбины требуют особо тщательного подхода к выбору материалов, способов изготовления заготовок и последующей механической обработки, а также методики и средств контроля качества обрабатываемых валов на всех этапах технологического процесса.

2. Применяемые материалы и виды заготовок

Валы роторов турбин изготовляют из поковок. Поковки для валов, работающих при температуре металла не свыше 450° С, изготовляют из углеродистых и легированных сталей шести категорий (по прочности). Рекомендуемые марки стали согласно отраслевым техническим условиям (ОТУ 24-10-004-68) указаны в табл. 14.

Таблица 14

Механические свойства поковок валов и цельнокованых роторов судовых и стационарных паровых турбин из некоторых марок сталей по отраслевым техническим условиям

Категория	Механические свойства продольных образцов[1]					Рекомендуемые стали[2] для работы при температурах 400—450° С
	$\sigma_в$		δ_5 в %	ψ в %	Угол загиба (в град) на оправке $d=40$ мм (не менее)	
	в Н/мм²	в кгс/мм²				
I	520	52	19	40	180	35, 40
II	580	58	17	40	180	34ХМ1А
III	650	65	15	40	160	34ХМ1А, 35ХМ, 34ХН1М
IV	720	72	15	40	160	34ХМ1А
V	820	82	14	40	150	34ХН1М, 34ХН3М
VI	870	87	13	40	150	34ХН1М, 34ХН3М

[1] Различные механические свойства одних и тех же сталей достигаются за счет изменения режима термической обработки, который устанавливается в зависимости от химического состава, размера поковки и требуемых механических свойств материала.

[2] Указанные марки стали применяются и для дисков турбин.

В паровых и газовых турбинах для валов и цельнокованых роторов, работающих при температурах свыше 500° С, где требуется высокий уровень жаропрочных свойств материала, применяют молибденосодержащие стали, например хромомолибденовые, хромомолибденованадиевые, хромомолибденовольфрамованадиевые. При температурах свыше 700° С применяют сплавы на никелевой основе, а также на кобальтовой, молибденовой и смешанных основах. Некоторые из марок сталей, наиболее широко применяемых для деталей роторов, работающих при температурах выше 500° С, приведены в табл. 15.

Таблица 15

Механические свойства поковок валов, цельнокованых роторов и дисков паровых и газовых турбин

Марка стали	Механические свойства				Термическая обработка	Температура рабочей среды в °С
	$\sigma_в$		δ_5 в %	ψ в %		
	в Н/мм²	в кгс/мм²				
Р2МА	690—740	69—74	15—19	41—64	Двойная нормализация 970—990° С и 930—950° С; отпуск при 680—700 °С	535—540
20Х3МВФ	800	80	13	40	Закалка при 1050° С в масле, отпуск при 700° С	До 550
1Х12ВНМФ	750	75	15	45	Закалка при 1050° С в масле, отпуск при 680—700° С	До 580
1Х16Н13М2Б	580	58	30	35	Закалка при 1100—1130° С в воздухе, старение при 750° С — 12 ч	До 600
ХН35ВТ	650	65	15	35	Закалка при 1080° С в воде; старение при 850° С — 10 ч; при 700° С — 50 ч	До 650

Для изготовления поковки вала отливают слиток, у которого отношение длины к его диаметру равно примерно двум. От слитка отрезают верхнюю прибыльную часть весом около 25% от полного веса слитка, а снизу — донную часть не менее 5% от веса слитка. Проверка материала поковки по химическому составу и механическим свойствам должна подтвердить соответствие их техническим условиям.

Ось поковки должна совпадать с осью слитка. Внешнее очертание поковок должно приблизительно соответствовать наружным очертаниям валов (рис. 106, *а*) с учетом припусков по 30—40 мм на сторону для последующей обработки. В местах сложных очертаний поковкам придают упрощенную форму, т. е. делают напуск. Тогда короткие ступени, уступы и выемки не обжимаются, а куются по диаметру ближайшей большой стороны (рис. 106, *б*).

Нормы припусков для поковок, указанные в некоторых стандартных справочниках, для валов турбин не применимы. При назначении припусков для таких уникальных поковок исходят из технологических возможностей выполнения кузнечных операций, необходимости компенсации деформаций при термической обработке и ряда специфических требований и условий. С обоих концов поковка выполняется удлиненной на 400 мм. От каждого конца поковки отрезают по две пробы длиной по 200 мм каждая для испытаний. Одну пробу отрезают на заводе — изготовителе поковки после ее обдирки и термической обработки; вторую — на заводе — изготовителе вала. Вырезку проб производят на фрезерно-отрезных станках дисковыми пилами.

Металлургические заводы поставляют поковки роторов и валов, как правило, грубо обточенными и термически обработанными, по согласованным между поставщиком и заказчиком чертежам заготовок (РЧЗ) с установленными припусками для механической обработки и контрольных испытаний материалов. Размеры припусков обычно следующие: в радиальном направлении — по 15—20 мм на сторону, в осевом — примерно по 10 мм на каждый участок. Кроме того, для изготовления продольных образцов на каждом конце поковки даются припуски по 200 мм и для изготовления тангенциальных образцов и кольцевых проб (по дисковой части ротора) — 40 мм.

На рис. 107, для примера, показаны чертежи заготовок цельнокованых роторов высокого давления (рис. 107, *а*) и низкого давления (рис. 107, *б*) турбины К-200-130, в состоянии поставки.

Тонкими линиями показаны чистовые контуры роторов.

Кольцевые пробы необходимы для контроля внутренних напряжений и изготовления тангенциальных образцов. Вырезка кольцевых проб для контроля внутренних напряжений производится по специальной методике, описанной в гл. IX. Пробы *Б* с обоих концов вала должны показать качество металла со стороны верха и низа слитка. Вырезают эти образцы на расстоянии $^1/_3$ радиуса от поверхности поковки.

Поковки валов и цельнокованых роторов, с целью определения качества металла, подвергают следующим видам проверок: определению химического состава, остаточных внутренних напряжений и механических свойств; перископическому осмотру центрального отверстия; микро- и макроструктурному анализу

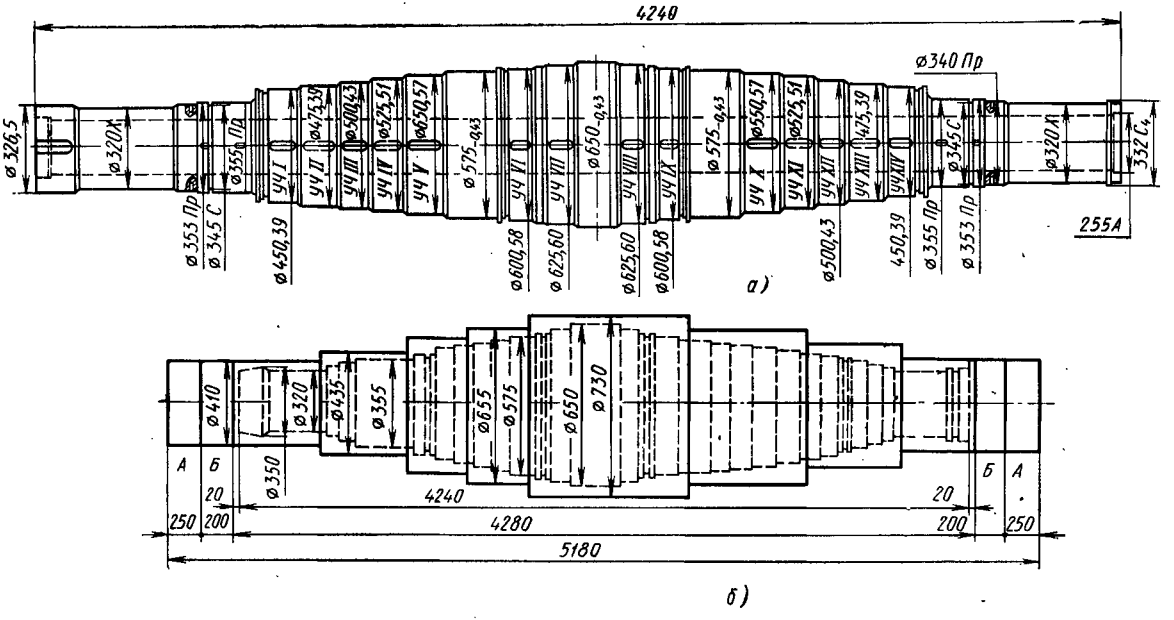
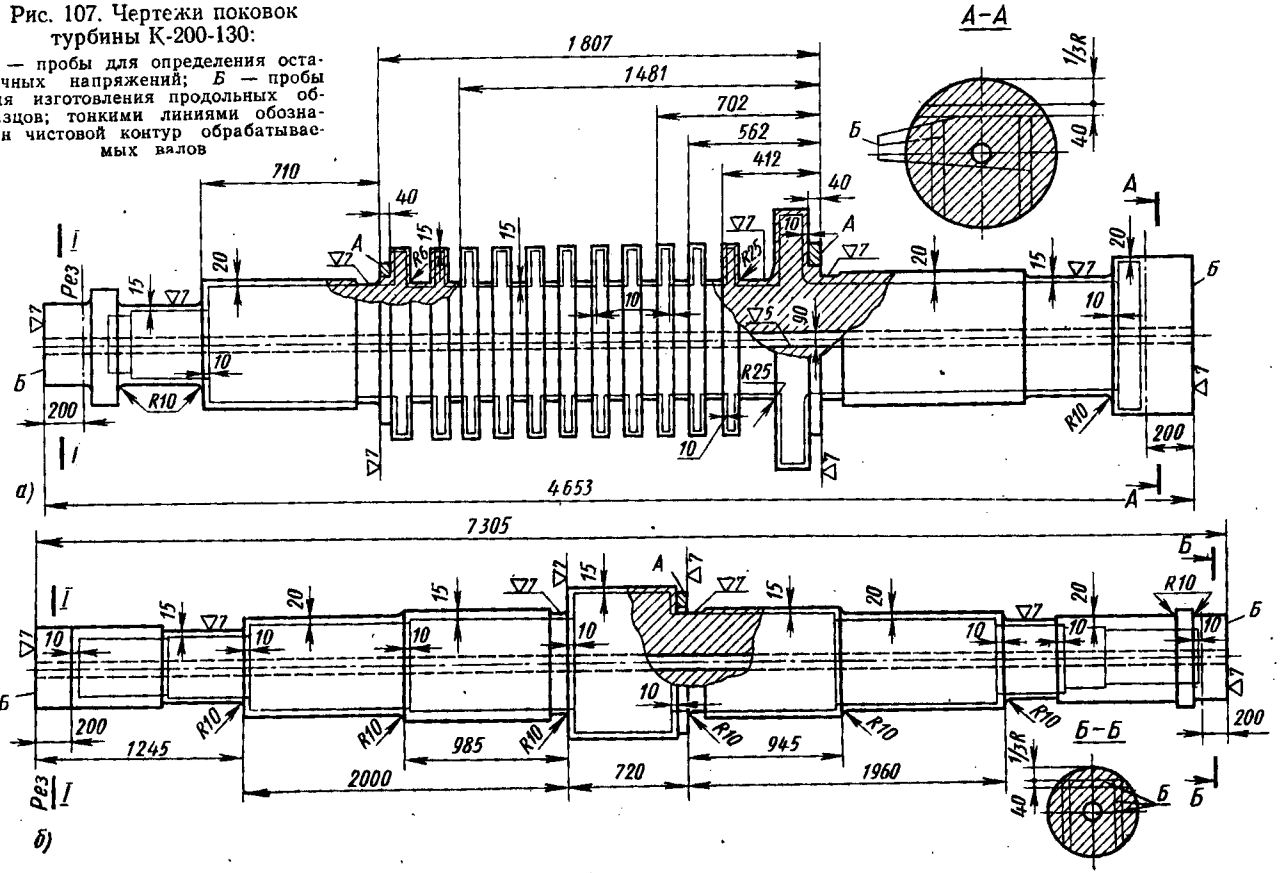


Рис. 106. Ступенчатый вал (*а*) и поковка для него (*б*); *А* — припуски для проб на заводе — изготовителе поковки; *Б* — припуски для проб на заводе — изготовителе вала; сплошными линиями изображен контур поковки; штриховыми — контур вала

Рис. 107. Чертежи поковок турбины К-200-130:

А — пробы для определения остаточных напряжений; *Б* — пробы для изготовления продольных образцов; тонкими линиями обозначен чистовой контур обрабатываемых валов



на предмет обнаружения флокенов, трещин и других пороков; контролю на равномерность распределения серы и фосфора путем снятия серных отпечатков; ультразвуковому контролю; тепловым испытаниям.

Химический состав определяется по плавочной пробе, отбираемой при разливке стали. Все остальные виды испытаний поковок, кроме теплового, производятся дважды: первый раз на металлургическом заводе при сдаче поковки заказчику; второй раз — в порядке контроля на самом турбинном заводе, что объясняется его высокой ответственностью за работу турбины в процессе ее эксплуатации. Тепловые испытания проводятся один раз, так как для этого вида испытания требуется, чтобы радиальный припуск против чистовых размеров был минимальный. Обычно его принимают равным 2—3 мм.

Подробнее с процессами контроля и методикой проведения испытаний поковок для валов турбин можно ознакомиться по отраслевой литературе.

3. Основные технические требования к механической обработке валов и цельнокованых роторов

Основными техническими требованиями к процессу механической обработки валов и роторов, обычно указанных в чертежах турбины, являются следующие:

а) большинство основных размеров валов и цельнокованых роторов должны выполняться по 2-му классу точности, а отдельные из них (например, размеры мест под посадку дисков) — по 1-му классу; размеры мест под посадку лопаток должны выполняться по 3-му классу;

б) чистота обработки поверхности опорных шеек должна соответствовать 9-му классу; участков под насадку дисков и других деталей — 7-му классу; резьб и неответственных фасок — 5-му классу; остальных участков — 6-му классу;

в) овальность, конусность и неконцентричность участков под насадку рабочих колес и других деталей обычно не должны превышать 0,02 м; опорных шеек — не более 0,015 мм;

г) смещение центрального отверстия относительно опорных шеек обычно допускается не более 0,3 мм;

д) радиальное биение не должно превышать: 0,02 — для опорных шеек роторов и валов паровых и газовых турбин; 0,05 мм — для роторов осевых компрессоров; 0,02 мм на длине 800 мм от места посадки диска — для консольных роторов;

е) допустимое торцовое биение по упорному диску, выточенному за одно целое, и фланцу жесткой муфты по присоединительной стороне должно быть не более 0,015—0,02 мм; по ободу дисков цельнокованого ротора — 0,05 мм; по всем уступам вала с насадными дисками — 0,01—0,03 мм;

ж) перекос шпоночных пазов относительно оси ротора допускается не более 0,015 мм на каждые 100 мм длины; перекос боковых граней паза — не более 0,03 мм. При двух или трех шпоночных пазах несимметричность расположения пазов относительно оси вала не должна превышать 0,05 мм.

4. Типовые технологические процессы механической обработки

Технологический процесс механической обработки валов и цельнокованых роторов состоит из предварительной и окончательной обработки.

Последовательность предварительной механической обработки валов и цельнокованых роторов, независимо от их конструкции и размеров, в основном принимается одинаковой и состоит в следующем:

а) зачистка торцов поковки;

б) проверка поковки для определения размеров припусков на обработку и разметка центровых отверстий (гнезд или центров);

в) обработка центровых отверстий;

г) обдирка поковки с припуском по 15—20 мм на сторону;

д) травление поверхностей вала для выявления флокенов и снятие серных отпечатков для выявления неметаллических включений и характера их распределения;

е) сверление и предварительная расточка центрального отверстия с припуском 15—20 мм на диаметр;

ж) термическая обработка для повышения механических свойств с последующим высоким отпуском для снятия внутренних напряжений;

з) отрезка проб для изготовления образцов и испытание образцов для определения механических свойств материала;

и) вторичная обдирка с припуском по 5—8 мм на сторону;

к) обработка под тепловое испытание с припуском 1 мм на сторону и тепловое испытание.

Дальше следует окончательная чистовая обработка до получения размеров и качества всех элементов поверхности детали в соответствии с требованиями чертежа.

Предварительная обработка. Обработку вала начинают с зачистки торцов поковки, которая облегчает ее проверку и разметку. На торцах зачищают небольшие площадки; при разметке на этих площадках наносят по две пересекающиеся линии, определяющие положение оси поковки. Зачистка выполняется путем фрезерования на горизонтальном сверлильно-фрезерном станке.

После зачистки поковку вала *1* (рис. 108) устанавливают на разметочную плиту и разбивают мелом на сечения *аа*, *бб*, *вв*

и т. д. С обеих сторон поковки ставят угольники *2*. Верхнюю поверхность поковки окрашивают меловой краской. От угольника откладывают отрезки (например, отрезок *М*), равные радиусу, увеличенному на величину припуска для чистовой обработки. Расстояние *К* между точками в одном сечении показывает толщину слоя металла на диаметр, который нужно удалить при черновой обработке.

Соединив середины расстояний между этими точками в каждом сечении, получим среднее положение осевой линии поковки. Для определения правильного положения оси вдоль вала натягивают струну *АБ*, которая должна проходить между намеченными точками. Струну нужно натянуть так, чтобы припуски с обеих сторон расположились по возможности одинаково. Положение струны у торцов отмечают рисками *СС*. По положению струны накернивают точки, которые соединяют риской.

Повернув вал приблизительно на 90°, повторяют разметку в другой плоскости и наносят на торцах риски *ТТ*. В точках пересечения рисок намечают места центровых отверстий. Если при разметке будет установлено, что величина припусков является недостаточной или она вовсе отсутствует и поковка не поддается правке, то поковку бракуют, не приступая к дальнейшей обработке.

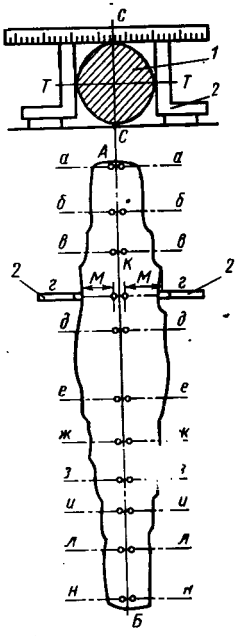


Рис. 108. Схема разметки вала турбины

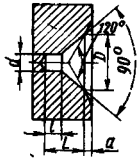
Центровка вала. У валов турбин центровые отверстия выполняют с углом зенковки 90° и добавочным предохранительным конусом с углом 120°. Размеры центровых отверстий приведены в табл. 16. Центровку выполняют на горизонтальном сверлильно-фрезерно-расточном станке с обеих концов вала.

Обдирка поковки. Обдирку поковок турбинных валов и цельнокованых роторов крупных размеров производят на токарно-центровых станках большой мощности, с двумя или тремя суппортами для одновременной работы несколькими резцами. При обработке один конец вала крепят кулаками планшайбы, другой подпирают центром задней бабки.

При обдирке крупных и тяжелых валов необходимо работать с люнетами, применяя центра лишь в исключительных случаях или в качестве дополнительных опор; шейки под люнеты точат на центрах. Чистота обработки поверхности шеек не ниже 7-го класса. На шейки под люнет целесообразно насаживать шариковые подшипники, что позволит работать на увеличенных скоростях резания [17]. При обработке коротких валов устанав-

Таблица 16

Размеры центровых отверстий в мм



Диаметр вала в мм	Масса в кг	D	d	l	L	a
160—300	2000	48	12	15	32	4
300—500	5000	70	18	18	44	7
500—900	20000	100	20	20	60	8
900—1300	40000	120	20	32	72	10

ливают один люнет на конце вала для разгрузки заднего центра. При обработке длинных валов ($l > 12d$) применяют два люнета.

Валы обдирают согласно обдирочному чертежу, оставляя припуски для дальнейшей обработки по 15—20 мм на сторону. Обдирочный чертеж разрабатывается также с учетом припусков, необходимых для подвешивания вала в процессе его термической обработки. Термически обрабатывают валы, подвешивая их вертикально в шахтных печах.

При обдирке валов применяют резцы из быстрорежущей стали и твердосплавные. Соответственно большим силам резания сечение резцов составляет 60 × 90 мм. Весьма удачными для применения при обработке валов являются резцы конструкции Уралмашзавода (рис. 109). Головки этих резцов выполнены в виде клиновых вкладышей с припаянными к ним пластинками из твердого сплава Т5К10. Вкладыши в клиновом пазу стержня резца закрепляются силами резания. При такой конструкции значительно облегчается и ускоряется переточка резцов.

Сверление и растачивание центральных отверстий. Центральные отверстия у валов стационарных турбин предусматриваются для контроля качества металла путем перископического осмотра, а у судовых турбин еще и для снижения веса. Большинство отверстий выполняется сквозными одного диаметра, но бывают ступенчатые и бутылочной формы. Последние встречаются у судовых турбин, где снижение веса имеет особенно большое значение. Размеры отверстия зависят от размеров вала и достигают 200—250 мм в диаметре и 8000 мм по длине.

Центральные отверстия валов турбин относятся к глубоким отверстиям. Отношение их длины к диаметру достигает 40 и более.

Сверление и растачивание отверстий производят на специальных горизонтально-сверлильных станках для глубокого сверления или на крупных токарных станках, снабженных специальными приспособлениями. На рис. 110 схематично показа-

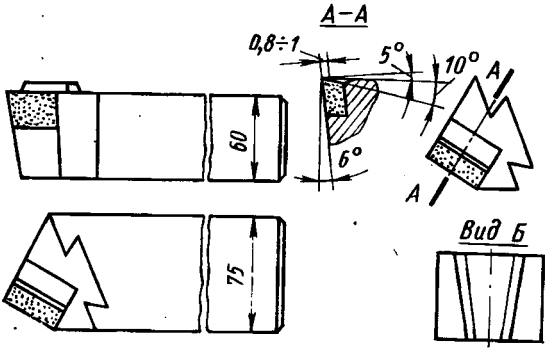


Рис. 109. Проходной правый резец с клиновым креплением вкладыша

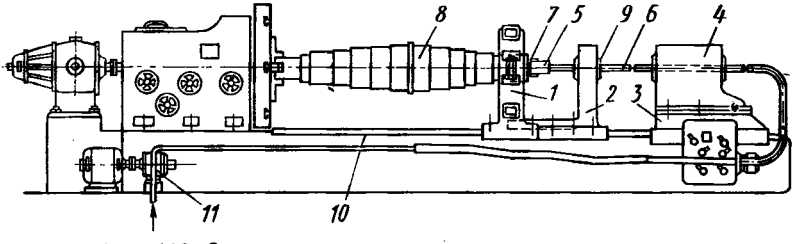


Рис. 110. Схема установки вала для глубокого сверления

на установка вала *8* на токарно-центровом станке *10*, приспособленном для глубокого сверления.

Обрабатываемый вал устанавливают одним концом в кулаки планшайбы, другим в люнет *1*. У задней бабки *3* верхняя часть делается съемной и может заменяться приспособлением *4* для крепления сверлильной или расточной борштанги *6*. Задняя бабка имеет механическую подачу, величина которой при помощи зубчатого механизма регулируется в пределах 0,05—4 мм. Станки снабжаются специальным люнетом *2* для направления и опоры борштанги. Во время работы борштанга *6* поддерживается и направляется сменными втулками *9*. Сверлильную головку *5* с установленным на ней сверлом *7* вводят в подготовленное заранее в валу направляющее отверстие, расточенное с высокой точностью и без биения.

Одновременно с началом сверления включают в работу насос *11*, обеспечивающий подачу охлаждающей жидкости. Производительность насоса должна быть не ниже 140—250 л/мин; давление жидкости — 100—150 Н/см² (10—15 кгс/см²). Чем меньше диаметр отверстия и больше его длина, тем больше должна быть величина давления жидкости.

Существует два способа подачи охлаждающей жидкости к сверлу. При первом способе охлаждающая жидкость нагнетается к месту резания через центральное отверстие сверлильной головки и потом вместе со стружкой выходит по кольцевому каналу, образованному стенкой отверстия и борштангой (наружный отвод стружки). При втором способе жидкость подается по внешнему каналу, а выходит со стружкой в отверстие сверла и борштанги (внутренний отвод стружки). Подача жидкости в обрабатываемое отверстие при этом способе осуществляется с помощью специальных устройств [4]. При наружном отводе стружки диаметр борштанги делают наименьшим (при обеспечении достаточной ее прочности и жесткости), чтобы обеспечить лучшее вымывание стружки.

Для сверления центральных отверстий в турбинных валах применяют сверла двухстороннего резания, т. е. с двумя режущими кромками. Такое сверло диаметром 150 мм (рис. 111) со-

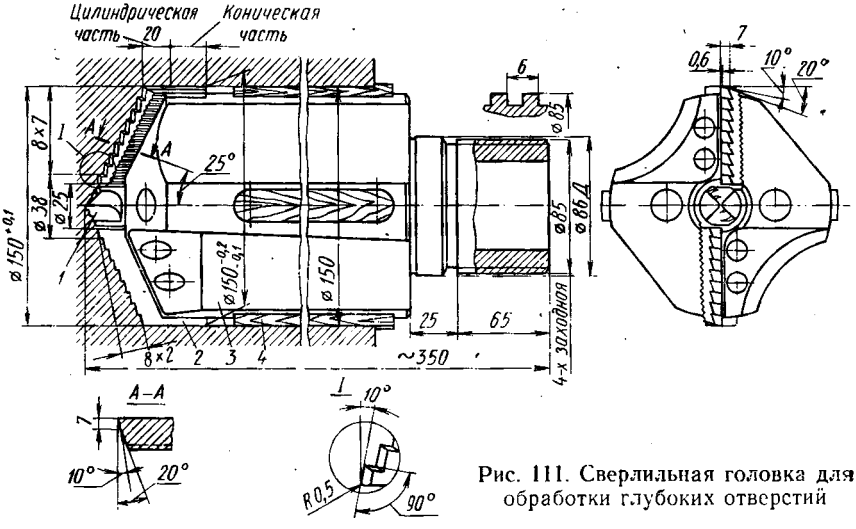


Рис. 111. Сверлильная головка для обработки глубоких отверстий

стоит из центрального сверла *1* диаметром 25 мм; двух ножей *2* и корпуса *3* с направляющими колодками *4*. Сверла такой конструкции изготовляют диаметром 70—150 мм. В работе они дают хорошие результаты.

При обработке отверстий диаметром более 150 мм после сверления производят растачивание, для чего применяют спе-

циальные расточные головки (рис. 112). Охлаждающая жидкость к резцам подводится через центральное отверстие. Головкой с тремя резцами за один проход диаметр подготовленного сверлением отверстия можно увеличить на размер до 30 мм. На рисунке показана головка с двумя резцами для последнего прохода; второй резец — чистовой.

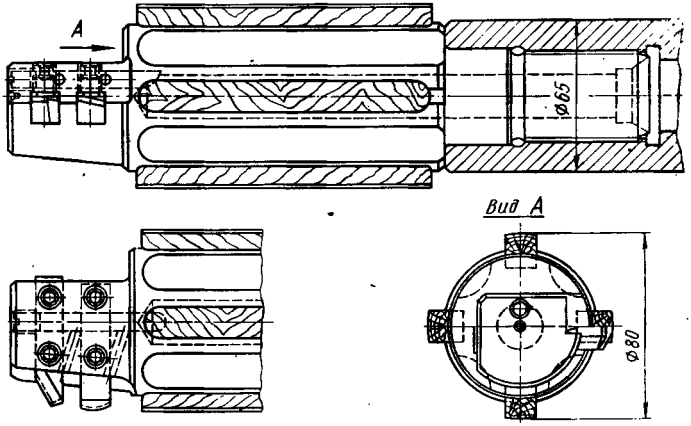


Рис. 112. Расточная головка для обработки глубоких отверстий

Перед сверлением для сверлильной головки подготовляют направление (заход). С этой целью предварительно сверлят и растачивают отверстие, по глубине и диаметру равное размерам сверлильной головки. Подготовку захода делают как для сверл, так и для расточных головок, перед каждым следующим проходом. Скорость резания при глубоком сверлении и растачивании 14—16 м/мин; подача на оборот 0,2—0,25 мм.

Материалом для направляющих колодок расточной и сверлильной головок служит дерево твердой породы — бакаут или самшит. В крайнем случае применяют бук, клен, ясень, дуб или березу. Для обработки колодок по диаметру направляющего отверстия поступают следующим образом. На торце вала возле отверстия, подготовленного под заход сверла или расточной головки, делают глубокие насечки зубилом. Эти насечки при вращении вала срезают припуск (1—2 мм) на колодках головки, и она входит в отверстие вала плотно, без зазора.

Поверхность отверстия под перископический осмотр должна быть выполнена не ниже 6-го класса чистоты, но такую чистоту получить резцовой головкой невозможно, поэтому отверстие обычно подвергается дополнительной обработке развертыванием. Операция эта выполняется специальной плавающей разверткой (рис. 113), которую устанавливают в головку, аналогичную расточным.

В валах и цельнокованых роторах судовых турбин нередко применяются уширенные центральные отверстия так называемой бутылочной формы. Такие отверстия растачиваются с помощью специальных борштанг (рис. 114). Крепление резцов в борштанге осуществляется силой резания. Для этого резцы устанавливаются в конических пазах. Глубина расточки выдерживается по упорам или заметкам на борштанге.

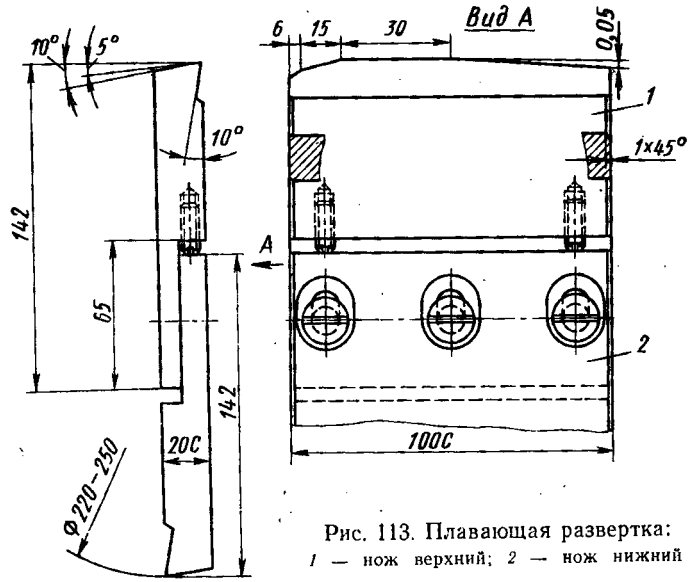


Рис. 113. Плавающая развертка:
1 — нож верхний; 2 — нож нижний

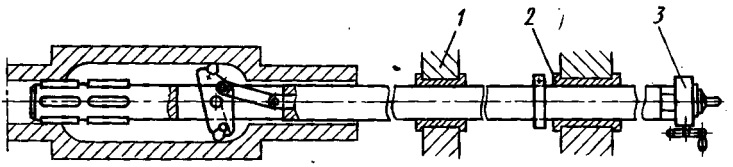


Рис. 114. Схема работы борштанги для сверления в валах отверстий бутылочной формы:
1 — люнет; 2 — вкладыши суппорта; 3 — редуктор

При небольших длинах турбинных валов и единичном производстве, когда изготовление сложной специальной борштанги является нецелесообразным, подобные отверстия растачивают при помощи особой консольной резцовой оправки и шаблона, устанавливаемого около станка возле резцовой оправки. На оправке укрепляется игла. Оперируя двумя подачами, токарь ведет иглу оправки по шаблону, а резец при этом обрабатывает отверстие, копируя движение иглы.

Обработка вала под тепловое испытание. Под тепловое испытание вал обрабатывается с припуском 2 мм на сторону. Шероховатость поверхностей средней части вала, где устанавливается индикатор для контроля биения, и двух опорных шеек должна быть не ниже 7-го класса чистоты, остальных поверхностей вала — приблизительно 2-го класса. Вал обрабатывают с одной установки по всей длине за исключением левого конца, закрепленного в кулаках планшайбы, который обрабатывается со второй установки. Затем вал проходит тепловое испытание. Сборные валы судовых и газовых турбин испытывают в собранном виде.

Тепловое испытание имеет целью проверить однородность структуры материала поковки для вала по всей ее толщине. Неравномерность структуры, наличие рыхлот и других дефектов металла может приводить к появлению различных коэффициентов линейного расширения на противоположных сторонах поковки, что неизбежно приведет к изгибанию вала при его нагревании и, как следствие, к образованию недопустимой вибрации турбины в процессе ее работы. Тепловое испытание позволяет своевременно отбраковать дефектные валы или роторы. Этому виду испытания подвергаются заготовки валов или роторов, имеющих в рабочих условиях температуру в какой-либо части не менее 250° С.

Процесс теплового испытания заключается в следующем. Вал при медленном вращении (0,5—3 об/мин) постепенно нагревают при скорости нагрева, не большей 50 °С/ч, до температуры, превышающей рабочую на 50° С. Не снижая частоты вращения, вал выдерживают при этой температуре 72 ч. Затем, не прекращая вращения, вал медленно охлаждают вместе с печью до температуры 200° С, после чего процесс испытания прекращают. Во избежание искривления вал продолжают вращать, пока его температура не понизится до 50° С.

На протяжении всего режима испытания через каждый час измеряют биение (прогиб) вала индикатором и температуру как в рабочем пространстве печи, так и внутри центрального отверстия вала. Скрытые дефекты и внутренние напряжения вызывают искривление оси вала при таком испытании. По величине и степени постоянства искривлений определяют пригодность вала к работе. По техническим условиям обычно допускается прогиб валов, испытываемых при нагревании до температуры, превышающей рабочую на 50° С, не более чем 0,05 мм.

Установка для теплового испытания состоит из специализированного станка и электропечи (рис. 115). Можно применять также специально приспособленный токарно-центровой станок. Испытываемый вал устанавливают на двух роликовых люнетах. При этом биение по контрольным пояскам посредине не должно превышать 0,02 мм. Люнеты располагаются вне печи. Вал в холодном состоянии вращают в течение одного часа, по-

сле чего производят повторную проверку установки. Вращение от станка к валу передается с помощью поводковых пальцев с гибкой связью или при помощи торсионного валика с фланцевым креплением. Станок должен иметь приспособление и для ручного проворачивания вала.

Во время теплового испытания остановка станка не допускается. В случае неожиданного прекращения подачи электроэнергии станок проворачивают вручную.

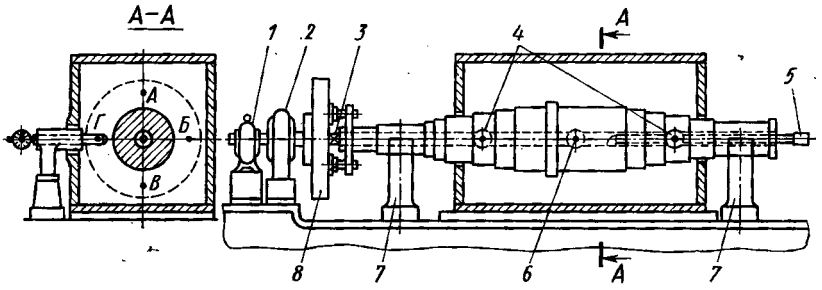


Рис. 115. Схема установки вала для теплового испытания:

1 — электродвигатель; *2* — редуктор; *3* — гибкая связь; *4* — термопара для определения температуры пространства печи; *5* — термопара для определения температуры вала; *6* — индикаторное устройство; *7* — роликовые опоры (люнеты); *8* — планшайба станка

Окончательная чистовая обработка. При окончательной обработке валов и цельнокованых роторов особое внимание следует уделять правильной установке и проверке их положения на станке. Известно, что при обработке деталей типа тел вращения самой надежной базой являются центровые отверстия.

На чистовую обработку валы турбин поступают с просверленными и окончательно обработанными центральными отверстиями. Сборные валы газовых турбин перед чистовой обработкой окончательно собирают и стягивают болтами.

Одним из основных требований к качеству окончательной обработки валов и роторов является обеспечение концентричности их центральных отверстий и наружных поверхностей. Чтобы выполнить это требование, в центральное отверстие с обоих концов устанавливают пробки с точно обработанными в них центровыми отверстиями (центрами), которые и принимают за основную базу для всего процесса последующей чистовой обработки как базовых крайних шеек, так и всего вала. В дальнейшем, при необходимости, положение вала на станке можно контролировать по базовым шейкам.

При обработке ступенчатых валов наиболее ответственным процессом является получение точных размеров длины отдельных ступеней. Допуски на размеры этих длин задаются, обычно, в пределах 0,02—0,1 мм, что по численным значениям совпадает примерно с допусками 2-го и 3-го классов точности. Та-

кой высокой точности обработки длин ступеней вала можно достичь несколькими способами.

Наиболее совершенный способ состоит в применении приспособления с индикатором и набором штихмасов (рис. 116). За базу при измерении положения торцов отдельных ступеней принимается вертикальная плоскость среднего цилиндрического выступа. На станине станка после обработки торца среднего выступа (например, справа), не отводя резца, устанавливают стойку *1* с индикатором *2*. Штифт индикатора подводят к упорному пальцу *3*, установленному на суппорте станка, и замечают показание индикатора. Для подрезки следующих торцов суппорт переводят соответственно на величины *а—д* и т. д., помещая между индикатором и упорным пальцем штихмас *4* соответствующего размера; показание индикатора при измерении положения торца каждой ступени обрабатываемого вала должно оставаться равным его показанию при первом положении суппорта. Штихмас поддерживают две стойки *5*. Этот способ позволяет измерять длину уступов с точностью до 0,03 мм и отказаться от применения шаблонов, дающих меньшую точность измерений. Для получения более точных результатов измерений торцы штихмасов *4* делают сферическими. При единичном изготовлении валов применяют составные наборные штихмасы с микрометрической головкой.

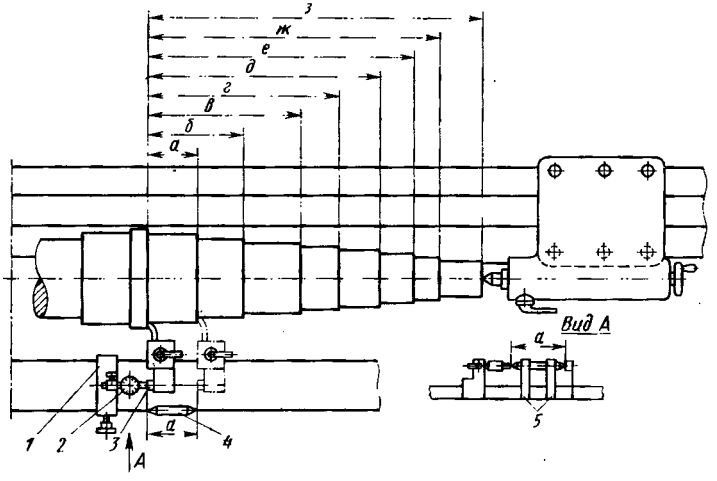


Рис. 116. Приспособление с индикатором для обработки и измерения длин ступеней вала

Чтобы избежать применения чрезмерно больших штихмасов при обработке особо длинных валов, их разбивают на несколько участков, включающих в себя по нескольку уступов. После обработки последнего уступа первого участка положение суп-

порта и резца не изменяют, а стойку с индикатором передвигают к суппорту. Обработку уступов второго участка производят описанным выше способом по соответствующим штихмасам. Таким же образом производят настройку положения инструментов для обработки каждого последующего участка вала.

Диаметры цельнокованых роторов достигают 1500—2000 мм. Измерения больших диаметров, имеющих допуски второго класса, производят специальными микрометрическими скобами. После снятия замера, для чего обычно требуется два

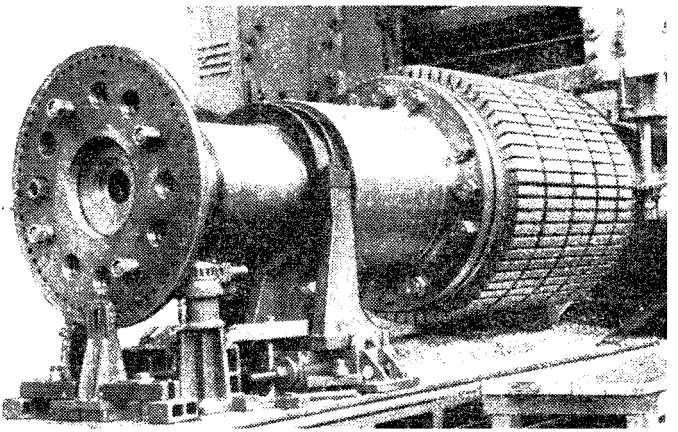


Рис. 117. Схема обработки пазов в роторе газовой турбины

человека, скобу проверяют микрометрическим штихмасом; во избежание влияния деформации скобы на точность промеров скобу необходимо проверять в том же положении, в каком производилось ею измерение диаметра обрабатываемого ротора.

При обработке в валах и роторах галтелей, радиусы которых обычно имеют величину 1—100 мм, применяют специальные галтельные резцы и приспособления.

В роторах цельнокованых и барабанного типа, в которых рабочие лопатки набираются в пазы, проточенные в телах дисков или барабанов, точение пазов производится методом постепенного приближения их вида к окончательной форме и размерам, аналогично точению пазов в дисках (например, см. рис. 98). На рис. 117 показано прорезание пазов в роторе газовой турбины под торцовую заводку лопаток. Шаг пазов выдерживается с помощью делительного диска, закрепляемого на роторе, и фиксатора, устанавливаемого на столе станка (окончательную обработку таких пазов см. на рис. 15, а установку лопаток — на рис. 7).

Окончательную токарную обработку после теплового испытания вала выполняют с припуском под шлифование 0,5—0,6 мм на диаметр. Шлифуют опорные шейки и места под насадку дисков; остальные места, за исключением торцов, галтелей и конуса для получения муфты, обрабатывают окончательно. Резьбу на валу точат после шлифования. После чистовой токарной обработки производят травление для выявления флокенов на опорных шейках и торцах и для серных проб.

Шлифование ведут в центрах с поддержанием вала люнетами, которые устанавливают на расстояниях друг от друга, равных 10—12 диаметрам вала. Шлифование разделяют на предварительное и чистовое. Предварительное шлифование ведется кругами зернистостью 24—36, твердостью С или СТ, глубиной 0,03—0,04 мм, при подаче, равной $^2/_3$—$^3/_4$ ширины шлифовального круга. Под чистовое шлифование следует оставлять 0,04—0,05 мм.

Чистовое шлифование выполняется кругами зернистостью 40—50 средней и весьма твердой связки (С и ВТ). Глубина при чистовом шлифовании равна 0,01—0,02 мм при подаче, равной $^1/_3$—$^2/_3$ ширины круга.

Процесс шлифования сопровождается обильным охлаждением жидкостью (15—20 л/мин). В качестве охлаждающей жидкости применяется эмульсия или содовая вода (на 100 л воды 2—4 кг кальцинированной соды). Частоту вращения круга ограничивают максимально допустимой окружной скоростью 25—30 м/с. Окружную скорость валов для предварительного шлифования принимают равной 6—8 м/мин; для чистового 4—6 м/мин. Не снимая вала со станка составляют паспорт замеров диаметров, производят травление на флокены и снимают серные отпечатки.

Окончательная обработка после шлифования включает подрезку торцов и зачистку галтелей в местах переходов всех ступеней (уступов); нарезание резьб; обработку конуса на конце вала для посадки полумуфты и другие мелкие операции зачистки и доделки обрабатываемых валов. Резьбы для крепления дисков, червяков, полумуфт и других деталей нарезают резцом. При крупных размерах резьб целесообразно вместо резьбовых калибров использовать специально изготовленные образцовые пробки обычной точности резьбы 2-го класса (для гаек), а резьбу на валах нарезать уже по изготовленным гайкам. Это вызывается сложностью изготовления крупных резьбовых калибров (особенно колец) в пределах требуемой точности; кроме того, они получаются настолько тяжелыми, что пользование ими становится ненадежным. Конусы на концах валов для посадки полумуфт также целесообразно контролировать по самим полумуфтам.

Фрезерование шпоночных пазов выполняют по разметке на специализированных фрезерных станках, а при отсутствии тако-

вых — на расточных станках (колонках). Размечают шпоночные пазы на разметочной плите или на токарном станке. При установке на плите геометрическая ось вала устанавливается строго параллельно плите. Для разметки применяют штангенрейсмус.

При наличии трех-четырех пазов на одной ступени вала пользуются делительным кольцом, при помощи которого настраивается фреза. Кольца изготовляются разъемными, что позволяет легко устанавливать и закреплять их на валу.

Допуски на изготовление шпоночных пазов для турбинных валов весьма жестки, выдержать их фрезерованием трудно, поэтому вводят дополнительную операцию — слесарную калибровку пазов. С этой целью на размер ширины паза оставляют припуск 0,1—0,2 мм для одного паза, расположенного на одной ступени, и 0,2—0,4 мм для двух пазов и более. По глубине паза припуска обычно не оставляют.

Обработка пароразгрузочных отверстий цельнокованого ротора. В цельнокованых роторах на теле каждого диска имеется по пять-семь пароразгрузочных отверстий, оси которых располагаются параллельно геометрической оси ротора. Диаметры этих отверстий колеблются в пределах 30—80 мм. Поверхности отверстий и галтели их должны быть отполированы. Сверление, развертывание и полирование пароразгрузочных отверстий являются весьма сложными операциями, так как общая суммарная протяженность пароразгрузочных отверстий со всеми интервалами их между дисками обычно имеет весьма большую величину, доходящую до 3 м. Обработку отверстий выполняют на расточных станках (колонках) при помощи специальных приспособлений и инструментов. Для предотвращения увода инструмента при сверлении применяют кондукторы.

Для выполнения перечисленных операций применяют специальные удлинители в виде борштанг требуемой длины с конусом Морзе для крепления в них сверл, зенкеров и разверток. Под установку ножа или резца для обработки галтелей в борштанге изготовляют прямоугольные пазы. В эту же борштангу устанавливают специальные полировальники для обеспечения соответствующей чистоты поверхностей обрабатываемых отверстий и их галтелей.

5. Изготовление сварных роторов

Роторы сварной конструкции применяют в тех случаях, когда из-за большого веса и размеров их не удается изготовить цельнокованными.

Технологический маршрут изготовления сварных роторов состоит из следующих этапов: механическая обработка деталей под сварку; сборка под сварку и сварка; термическая обработ-

ка для снятия внутренних напряжений; механическая обработка сварных швов для ультразвукового контроля; ультразвуковой контроль сварных швов; чистовая механическая обработка.

Механическая обработка основных элементов сварного ротора производится аналогично обработке цельнокованого ротора. В процессе обработки заготовки элементов ротора подвергают травлению на флокены, испытанию механических свойств, контролю распределения серы и фосфора и ультразвуковому контролю.

Точное фиксирование правильного взаимного положения элементов ротора перед сваркой осуществляется при помощи центрирующих поясков, толщина которых должна обеспечить расплавление их при наложении первого сварочного шва.

Сборка под сварку производится в вертикальном положении. Собранный ротор скрепляют стяжным приспособлением. Сварка ротора может производиться как в вертикальном, так и в горизонтальном положениях. Сварка в вертикальном положении проще, но требует применения сложного оборудования. Сварка в горизонтальном положении может производиться на токарном станке. Установка для сварки должна обеспечивать свободное расширение ротора от нагрева при сварке. В процессе сварки должна быть сохранена соосность свариваемых деталей ротора.

6. Сборка роторов

Особые условия работы турбин требуют, чтобы все детали ротора, наряду с надежным закреплением их против воздействия рабочей среды, имели бы еще и возможность свободного теплового расширения. Для этого необходимо точное выдерживание указанных в чертежах величин тепловых зазоров и осевых размеров. В качестве примера на рис. 118 показан чертеж комбинированного ротора турбины с размерными линиями для простановки размеров, обеспечиваемых в процессе сборки и обработки ротора после сборки.

На рисунке показаны: *1* — регулятор безопасности; *2* — фланец насадной; *3* — ротор турбины; *4* и *15* — кольцевые гайки; *5* — шайба; *6* — зубчатое колесо редуктора; *7* — стяжное кольцо; *8* — стопорное кольцо; *9* — упорный диск; *10* и *31* — маслозащитные кольца; *11*, *13*, *17*, *19*, *24*, *26* и *30* — разрезные упорные кольца; *12*, *14*, *16*, *18*, *20*, *25*, *27*, *28* и *29* — уплотнительные втулки; *21* — промежуточное кольцо; *22* — рабочее колесо 11-й ступени; *23* — рабочее колесо 12-й ступени; *32* — соединительная муфта. C и C_1 — зазоры в шпоночных соединениях. Допустимые величины зазоров указаны в табл. 17.

На рис. 119 в более крупном масштабе даны детали конструкции комбинированного ротора, а также приведены технологические указания по обработке этих элементов.

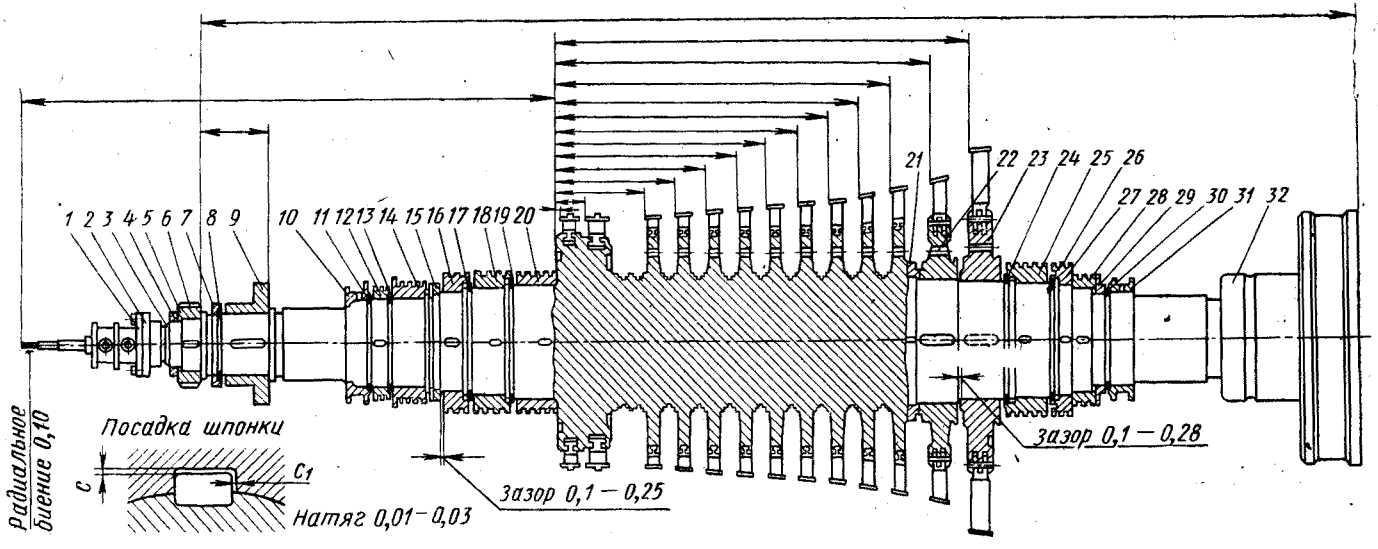


Рис. 118. Комбинированный ротор турбины

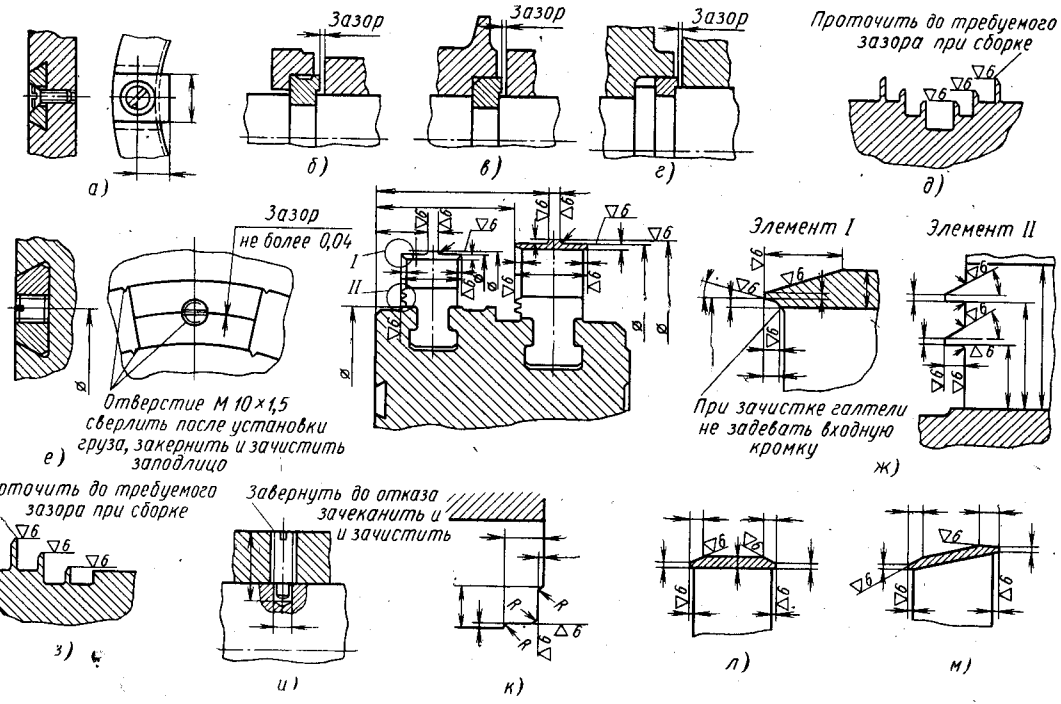


Рис. 119. Детали конструкции комбинированного ротора:

а — крепление кольцевых гаек; *б* — *г* — установка разрезных упорных колец (зазор в пределах 0,1 — 0,26 мм выдерживается шлифованием колец по замерам с места); *д* — проточка для уплотнительных втулок с целью обеспечения требуемых радиальных зазоров; *е* — детали крепления балансировочных грузов; *ж* — обработка бандажей и лопаток 1-й ступени после облопачивания; *з* — проточка втулки заднего уплотнения для создания требуемых радиальных зазоров; *и* — крепление маслозащитных колец (отверстие под винт сверлится и нарезается после сборки); *к* — проточка фасок на полумуфте для центровки роторов (фаски протачиваются после насадки полумуфты на вал); *л*, *м* — обработка бандажей после облопачивания ротора (свесы всех бандажей замеряются от кромки наиболее выступающей лопатки непосредственно под бандажом).

Таблица 17

Зазоры в шпоночных соединениях ротора

Зазор в мм	Размеры шпонок в мм			
	28×16	32×18	40×22	50×26
C	0,20—0,65	0,20—0,65	0,20—0,65	0,25—0,70
C_1	0,14—0,29	0,17—0,34	0,17—0,34	0,17—0,37

На собранные роторы составляют паспорта действительных размеров. Образец паспорта тепловых зазоров, радиальных и осевых биений показан на рис. 120.

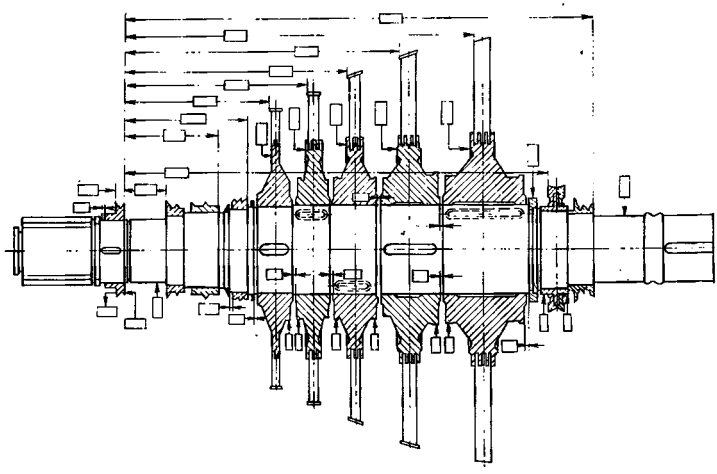


Рис. 120. Форма паспорта торцовых и радиальных биений ротора высокого давления

Типовой маршрут сборки ротора включает следующие этапы: подготовку деталей к сборке; сборку; механическую обработку после сборки; динамическую балансировку.

Подготовка деталей ротора к сборке состоит из внешнего осмотра на отсутствие дефектов (забоин, вмятин) на посадочных поверхностях деталей и обмера посадочных размеров валов, дисков, шпонок и других деталей, что необходимо для определения действительных величин зазоров и натягов и сопоставления их с требуемыми по чертежу.

Сборка ротора заключается в насадке на вал рабочих колес и других деталей с обеспечением требуемых натягов и зазоров. Расчетные величины натягов должны строго выдержи-

ваться. Посадка — горячая. Сборку ротора осуществляют при горизонтальном или вертикальном положении вала. В первом случае требуется использование специального пресса

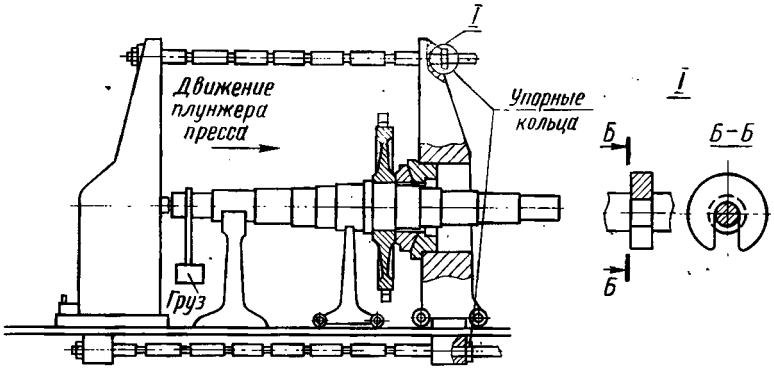


Рис. 121. Насадка рабочего колеса на вал с помощью специального горизонтального гидропресса

(рис. 121). В основном сборка роторов производится в вертикальном положении, для чего требуется значительно более простое оборудование (рис. 122 и 123).

Как указывалось выше, диски сидят на валу с натягом,

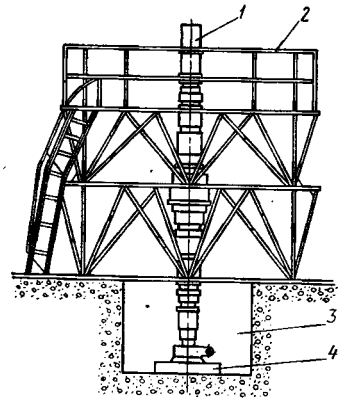


Рис. 122. Оборудование, применяемое для насадки рабочих колес при вертикальном положении вала:

1 — вал ротора; *2* — помост двухъярусный; *3* — приямок; *4* — плита для закрепления вала в вертикальном положении

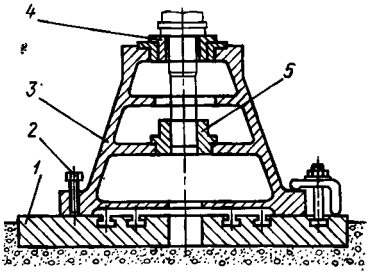


Рис. 123. Приспособление для установки вала в вертикальном положении:

1 — опорная плита; *2* — регулировочный винт; *3* — стойка; *4* — сменная втулка из двух половин; *5* — втулка

величина которого доходит до 0,6—0,7 мм. С целью увеличения размеров посадочных мест в момент насадки на вал рабочие колеса предварительно нагревают. Вследствие этого посадка рабочих колес производится свободно, что устраняет задиры и деформации.

При нагреве диска увеличивается не только диаметр его отверстия, но и длина ступицы. Первое является полезным, а второе (если его не учесть) может сказаться отрицательно. При схватывании диска с валом в процессе остывания ступица еще имеет увеличенную длину и продолжает сокращаться. Сокращение длины ступицы может идти в сторону упора или от упора, в зависимости от того, где диск сильнее обжимает вал. Согласно техническим условиям рабочие колеса должны быть насажены вплотную к упорам (допускаемый зазор не более 0,1 мм). Это обеспечивает их правильное осевое положение, которое должно сохраниться и после остывания дисков и вала.

При горизонтальном способе сборки ротора нагретое рабочее колесо продолжает прижиматься прессом к торцу посадочного места до момента полного остывания. При вертикальном способе нагретое рабочее колесо под воздействием собственного веса садится до упора; затем производится ускоренное охлаждение ступицы рабочего колеса возле упора путем подачи струи холодной воды к нижнему торцу. Этим обеспечивается защемление вала диском, в первую очередь у упора, и сохранение требуемого аксиального положения диска после его полного остывания. Охлаждение дисков водой возле упора имеет смысл при длинных ступицах, когда длина ступицы равна или больше $^2/_3$ диаметра диска. При более коротких ступицах охлаждение водой можно не производить. При очень длинных ступицах для посадки дисков на вал следует обязательно применять пресс.

Приспособление для кантовки вала (или ротора) в вертикальное положение показано на рис. 124, *а*. Перед установкой собираемого вала турбины в кантовочное приспособление к нему присоединяют рым (рис. 124, б), надевают и закрепляют хомут *5*, который состоит из двух половин, соединяемых между собой болтами. Для крепления рымов предусматривают на концах валов наружную или внутреннюю резьбы. При отсутствии такой возможности создают бурты (рис. 124, *в*) или резьбовые отверстия для крепления рымов к торцу вала болтами. При наличии буртов используют для подъема вала хомуты с цапфами.

Медленно поднимая один конец вала за рым и сохраняя при этом за счет перемещения тележки крана постоянный контакт цапф хомута *5* с опорами *2*, выводят вал из горизонтального в вертикальное положение, снимают с опор *2* и, не снимая хомута (если в этом нет необходимости), переносят вал на стенд для сборки ротора. При этом собираемый вал требуется выставить строго вертикально, для чего установку контролируют уровнем.

После насадки рабочих колес на первый конец вала ротор устанавливают вторым концом вверх с помощью того же кантовочного приспособления, изменив предварительно расположение рыма и хомута.

Нагрев рабочих колес перед насадкой осуществляют электрическими печами сопротивления или индукционными нагревателями. Мелкие детали нагревают газовыми горелками или бензиновыми лампами. При малых натягах, когда температура устанавливаемых на вал деталей доходит лишь до 100° С, их нагревание может производиться в кипящей воде.

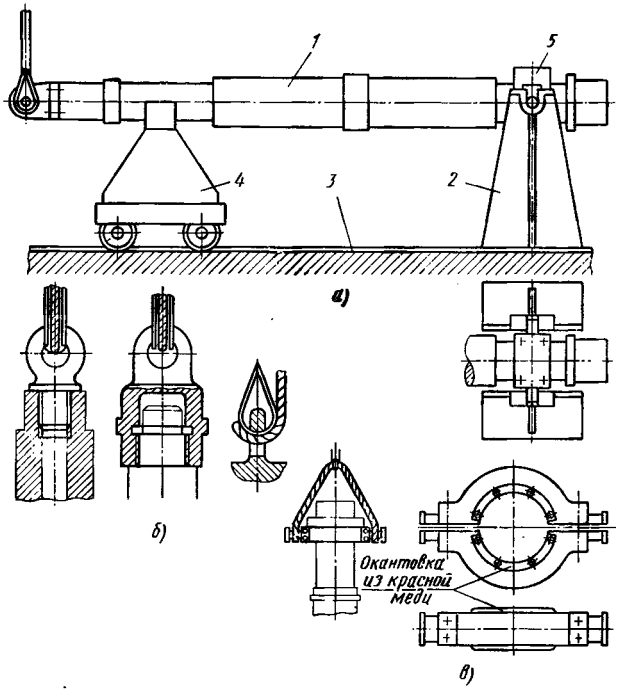


Рис. 124. Приспособление для кантовки вала в вертикальное положение:

а — приспособление в сборе; *1* — вал; *2* — опора; *3* — бетонное основание с рельсами; *4* — тележка; *5* — хомут; *б* — рымы с внутренней и наружной резьбами; *в* — хомут (для опоры вала или для подъема валов с буртами) из двух половин

Применение одиночных бензиновых ламп не обеспечивает необходимой равномерности нагрева, что часто является причиной коробления рабочих колес и, кроме того, удлиняет время нагрева. Для уменьшения коробления нагрев производят несколькими лампами одновременно. Температуру нагрева проверяют термометрами или термопарами. Нагрев деталей сварочными горелками аналогичен нагреву бензиновыми лампами, но вследствие большого выделения тепла сокращает время нагрева.

Нагрев индукционными нагревателями протекает неравномерно, так как сопротивление проходящего индуцированного

тока различно в ступице и у венца диска вследствие неравномерности распределения масс металла. Поэтому при использовании этого способа нагрева необходимо тщательно наблюдать за температурой в различных местах диска, не допуская разницы более 50° С. При достижении разницы температур в отдельных местах диска в 50° С нагреватель следует выключить и дать выравняться температуре во избежание коробления диска.

Наиболее совершенным методом нагрева считается нагрев в газовых и электрических печах, где обеспечивается равномерное расширение рабочего колеса; кроме того, в печи может одновременно нагреваться несколько рабочих колес, что значительно ускоряет процесс сборки ротора.

Необходимая температура нагрева деталей определяется по формуле

$$t = \frac{H + 2C}{D\alpha} + t_0,$$

где t_0 — температура помещения цеха в ° С;
H — величина максимального натяга в мм;
D — диаметр отверстия насаживаемой детали в мм;
α — коэффициент линейного расширения материала; для стали $\alpha \approx 0{,}00001$;
$C = 0{,}15 \div 0{,}2$ — зазор между отверстием и валом в мм.

Зазор, равный 0,15—0,2 мм, обеспечивает свободную насадку детали. Меньшая величина зазора принимается в тех случаях, когда после нагрева деталь может быть насажена на вал за меньшее время, учитывая малое расстояние от нагревателя до стенда, небольшую длину вала, удобство выполнения работы. Бо́льшая величина зазора принимается в тех случаях, когда после нагрева для насадки детали требуется большее время. После нагрева рабочих колес проверяют диаметр расточек жестким или микрометрическим штихмасом.

Перед установкой деталей на вал ротора соответствующее посадочное место вала тщательно протирают, осматривают и смазывают ртутной мазью, предохраняющей посадочные поверхности от заедания при насадке и от ржавления и прикипания во время работы турбины. После нагрева в печи деталь также просматривают и отверстие протирают мелкой наждачной шкуркой, а затем ветошью.

Для быстрой и правильной насадки рабочих колес необходимо, чтобы ось расточки рабочего колеса (диска) находилась строго в вертикальном положении. Проверка осуществляется уровнем до нагрева диска. Рабочее колесо поднимают специальным приспособлением, которое при помощи регулирующих гаек (талрепов) позволяет изменять длину ветвей и устанавливать таким образом диск в требуемое положение (рис. 125). После регулировки делают отметки на крюках ветвей и рымах, уста-

новленных в диске, чтобы после нагрева диска брать его теми же крюками за те же рымы, по которым была произведена предварительная регулировка подъемного приспособления. Поднятое колесо отцентровывают по валу, медленно опускают на посадочное место шейки вала, строго следят за тем, чтобы шпоночные пазы рабочего колеса совпали со шпонками на валу.

После насадки колеса и его остывания производят проверку плотности соприкосновения торца ступицы колеса и бурта вала или теплового зазора между ступицами двух соседних рабочих

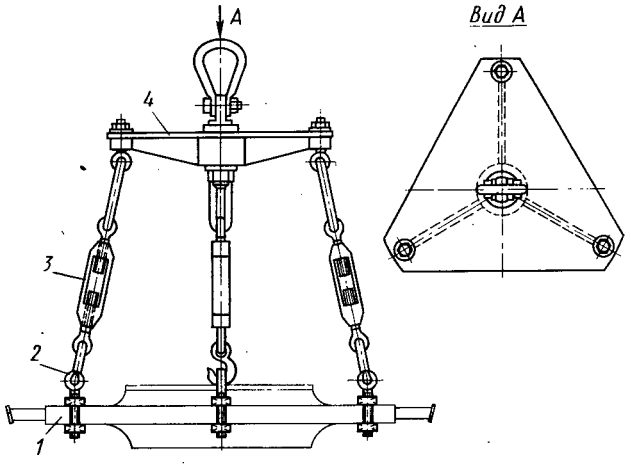


Рис. 125. Приспособление для подъема рабочих колес (дисков) при насадке их на вал:

1 — рабочее колесо; *2* — рымы, устанавливаемые в пароуравнительные отверстия диска; *3* — специальные гайки (талрепы) для регулировки длины ветвей приспособления; *4* — траверса

колес. При отклонениях больше допустимых необходимо снять рабочее колесо и произвести вторичную насадку.

Наличие биения рабочего колеса и его величину определяют путем замера положения венца по окружности. Замер производят с помощью приспособления, показанного на рис. 126; оно состоит из стойки *1* и индикатора *2*. Стойку устанавливают на шейку вала и вращают по окружности. При этом ножка индикатора, касаясь обода диска, показывает величину его биения. Крепление стойки осуществляют хомутом *3*.

После сборки ротор устанавливают на токарный станок и, пользуясь для замеров индикаторами, составляют его паспорт. В паспорте (см. рис. 120) указывают фактические величины, определяющие положение насаженных деталей. Допуски на биение основных деталей ротора турбины указаны в табл. 18. Если величина биений выходит за пределы сдаточных, разрешается

Таблица 18

Типовые допуски на биение основных деталей ротора турбины

Наименование поверхностей и деталей		Эскиз	Допускаемая величина торцового биения δ в мм			Допускаемая величина радиального биения δ_1 в мм	
Обод и ступица насаженного рабочего колеса			D	$\frac{D}{H}$	δ	0,1	
			До 1200	До 7	0,15		
				св. 7	0,2		
			1200—1600	До 7	0,2		
				св. 7	0,3		
			Св. 1600	До 7	—		
				св. 7	0,5		
Обод и ступица цельнокованого рабочего колеса			0,1			0,1	
Полумуфта	Эластичная		Поверхность		δ	Поверхность	δ_1 после насадки	δ_1 сдаточная
			А		0,03	*В*	0,1	0,1
			Б		0,1	*Г*	0,1	0,04

Наименование поверхностей и деталей		Эскиз	Допускаемая величина торцового биения δ в мм			Допускаемая величина радиального биения δ_1 в мм		
			Поверхность	δ		Поверхность	δ_1	
				после насадки	сдаточная		после насадки	сдаточная
Полумуфта	Полужесткая		*Б* *В*	0,1 0,1	0,1 0,03	*А* и *Д* *Г* и *Е*	0,1 0,1	0,1 0,05
	Жесткая		*А*	0,06	0,02	*Б*	0,1	0,04
Гребень упорного диска			*А*	0,06	0,02	0,08		

Продолжение табл. 18

Наименование поверхностей и деталей	Эскиз	Допускаемая величина торцового биения δ в мм	Допускаемая величина радиального биения δ_1 в мм		
Гребни уплотнительных втулок		—	*A*	0,08	0,05
Регулятор безопасности		—	0,1		
Заточка червяка		—	0,06		
Маслоотражательное кольцо			0,06		

проточить или прошлифовать поверхности, отмеченные знаками обработки на рис. 119.

По аксиальным замерам от упорного гребня до всех насаженных деталей определяют величину осевых зазоров в проточной части турбины.

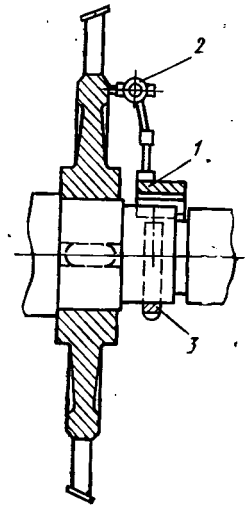


Рис. 126. Приспособление для проверки биения рабочих колес

7. Динамическая балансировка роторов

Отсутствие вибраций в турбине — одно из важнейших условий ее нормальной работы. Основной причиной образования вибрации является неуравновешенность ротора. Наличие неуравновешенных сил ротора приводит к появлению на опорах реакций, изменяющих направление своего действия при вращении ротора.

Эти силы сообщают подшипникам периодические импульсы, которые и вызывают появление вибрации. На рис. 127 показаны примеры динамической неуравновешенности роторов турбин.

На рис. 127, *а* показан частный случай, когда неуравновешенная масса *H* с радиусом расположения *x* уравновешивается грузом *y*, закрепленным на крайнем диске на радиусе *r*. Такой ротор статически будет уравновешен, а динамически останется неуравновешенным. Пара центробежных сил C_1 и C_2 с плечом *d* вызовет появление на подшипниках реакций, приводящих к вибрации

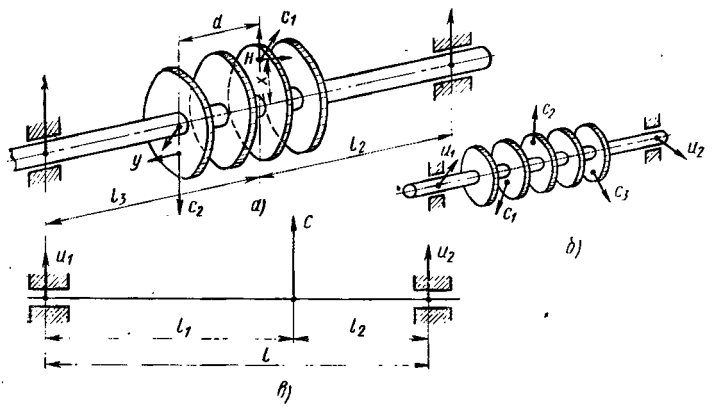


Рис. 127. Схема определения динамической неуравновешенности роторов:

а — частный случай; *б* — общий случай; *в* — схема разложения сил

турбины. Этот пример показывает недостаточность статической балансировки турбинных роторов.

В практике обычно имеет место общий случай динамической неуравновешенности, показанный на рис. 127, *б*. Реакции U_1 и U_2 являются результатом действия пары равнодействующих всех центробежных сил C_1, C_2, C_3 и т. д. от неуравновешенных масс ротора, расположенных вдоль его оси на различных радиусах.

Задача динамической балансировки заключается в том, чтобы создать искусственно в роторе добавочные силы, которые будут равны силам U_1 и U_2 и противоположны им по направлению. Эти силы в стационарном турбиностроении создаются обычно путем прикрепления на крайних дисках ротора уравновешивающих грузов.

В настоящее время, в связи с наметившейся тенденцией увеличения частоты вращения роторов и их массы, проблеме динамического уравновешивания турбин уделяется все большее внимание. От качества уравновешивания зависит не только общий уровень возникающих в процессе работы турбин вибраций, но также ресурс и надежность их работы, интенсивность и характер износа подшипников и кинематических пар.

Вопросы теории и практики уравновешивания машин и приборов, начиная с 1960 г., регулярно обсуждаются на Всесоюзных научно-технических конференциях по балансировочному оборудованию. Наблюдается интенсивное развитие теории уравновешивания машин и балансировочной техники. Для детального ознакомления с вопросом можно рекомендовать специальную литературу [6].

В связи с быстрым развитием техники, в настоящее время появилось много новых методов динамического уравновешивания роторов быстроходных машин и применяемого для этих целей оборудования. Однако, несмотря на большое разнообразие этих методов, их основа остается единой.

В данном учебнике не дается широкого освещения этой важной проблемы современного машиностроения. Цель настоящего параграфа состоит в том, чтобы в наиболее краткой, конспективной форме познакомить учащихся с теоретическими основами динамической балансировки, схемами применяемого турбинными заводами оборудования и осветить некоторые перспективы дальнейшего развития проблемы.

Наиболее распространенным методом динамической балансировки в практике турбинных заводов является классический метод «обхода грузом». При этом методе на крайних дисках подготовляемого к балансировке ротора намечают мелом восемь (или больше) точек для поочередного подвешивания одного и того же пробного груза при пробных пусках станка. Ротор устанавливают на станок для динамической балансировки (рис. 128). Вкладыши подшипников этих станков покоятся на пружинных балансировочных опорах (рис. 129). Рамы опор снабжены болтами *1* и *2*

левой и правой резьбы для закрепления опор *4*. Крепление осуществляется маховиком *3*.

Путем пробных пусков (первый раз — без груза, а последующие разы — с подвешиванием пробного груза в каждой из намеченных точек) измеряют величины амплитуд колебаний вклады-

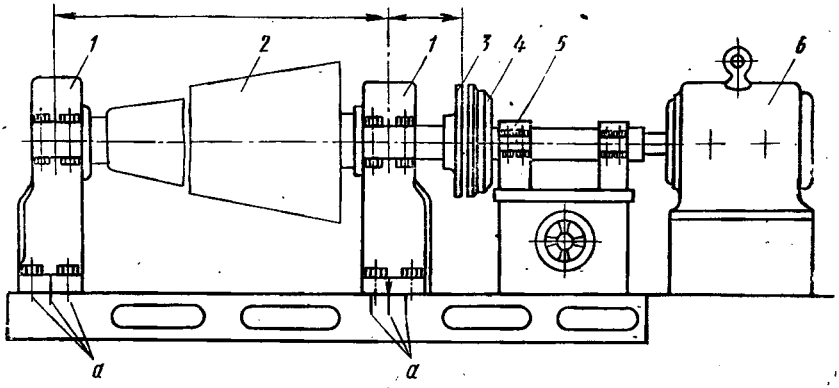


Рис. 128. Схема балансировочного станка:

1 — стойки опор; *2* — балансируемый ротор; *3* — муфта вала; *4* — магнитная муфта станка; *5* — бабка станка; *6* — электропривод; *а* — риски, определяющие положение стоек для типовых роторов

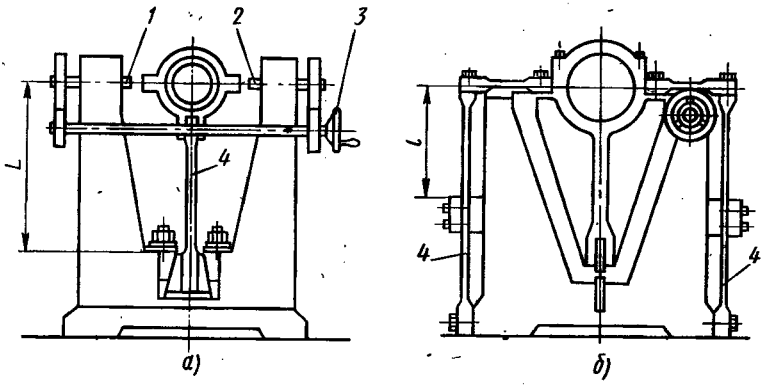


Рис. 129. Схема устройства стоек балансировочных станков:

а — система Лавачек-Гейман; *б* — системы Шенк

шей подшипников станка. Для измерения амплитуд пользуются индикаторами или амплитудомерами и записывают величины их в диаграмму (рис. 130). Подробно о диаграмме будет сказано ниже.

Сначала балансируется одна сторона ротора (например *А*, рис. 131), а затем — другая. Обычно начинают балансировку, с той стороны, которая при первом пуске без груза показала

бо́льшую неуравновешенность. В рассматриваемом ниже примере балансировка начинается со стороны *А*.

При балансировке одна опора вкладыша со стороны балансируемого конца ротора освобождена и может качаться свободно, вторая — зажата болтами *1* и *2* (см. рис. 129). При балансировке второго конца ротора первая опора зажата, вторая освобождена. Окончательная балансировка производится при обеих освобожденных опорах вкладышей. При каждом пуске ротора частота его вращения должна быть на 20—40% выше частоты вращения, вызывающей резонанс системы опор станка. Определение резонансной частоты вращения обычно осуществляется опытным путем при первых пусках.

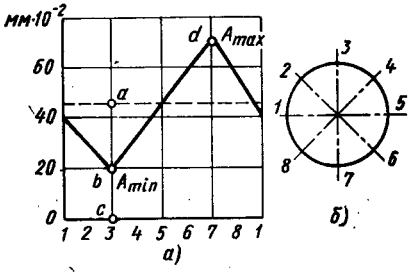


Рис. 130. Диаграмма динамической балансировки

Пуск ротора осуществляют следующим образом. Ротор, полностью собранный со всеми штатными деталями, укладывают на опоры станка. Проверяют подачу смазки к подшипникам. Включают магнитную муфту. Затем с помощью электродвигателя доводят частоту вращения ротора до максимально

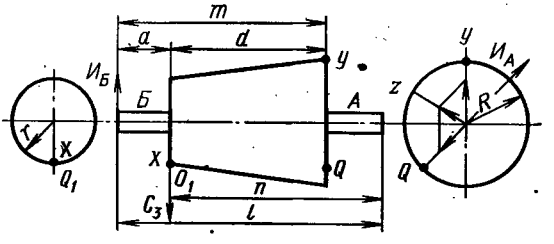


Рис. 131. Схема расположения и корректировки уравновешивающих грузов

возможной на данном станке; по достижении этого отключают электродвигатель и магнитную муфту от сети. При этом ротор продолжает свободно вращаться по инерции. Плавным движением освобождают болты *1* и *2*, фиксирующие опору вкладыша подшипника со стороны конца ротора, подвергаемого балансировке. Подводят индикатор к опоре и наблюдают за предельным отклонением его стрелки; одновременно проверяют частоту вращения ротора ручным тахометром. При прохождении через резонансную частоту вращения ротора колебание стрелки индикатора будет максимальным. Эту частоту вращения записывают.

Так как балансировка должна проводиться в условиях резонанса, то при всех последующих пусках ротор разгоняют до указанной выше резонансной частоты вращения плюс 50—70 об/мин.

Работы по динамической балансировке (см. рис. 131, сторона *А*) ведут в следующем порядке.

1. Максимальную амплитуду колебаний (обозначим ее a_0), замеренную при определении резонансной частоты вращения, записывают как первоначальную («пуск без груза»).

2. В зависимости от величины максимальной амплитуды во время пуска без груза выбирают пробный груз; ориентировочно его величину принимают $P = 10a_0$ г для стороны, с которой начинается балансировка (a_0 — количество делений амплитудомера), и $P = 5a_0$ г для второй, последующей балансировочной стороны. При этом не исключается необходимость корректировать величину пробного груза. Это может оказаться особенно нужным, если при последовательном перемещении пробного груза в каждой из восьми точек величины амплитуд колебаний получаются бо́льшими, чем при пуске без пробного груза, и если при максимальных амплитудах становится невозможно следить за размахом стрелки индикатора. В таких случаях пробный груз следует уменьшить.

3. Укрепив груз весом *P* в точке разметки *1* (см. рис. 130, *б*), запускают станок и записывают максимальную амплитуду колебаний головки; крепить груз надо всегда на одном и том же расстоянии от центра.

4. Грузом *P* обходят все восемь точек разметки.

5. На миллиметровой бумаге строят кривую (см. рис. 130, *а*), для чего по ординатам откладывают максимальные амплитуды колебаний опоры, а на абсциссе — развертку окружности размещения балансировочных грузов.

Построив кривую, наносят среднюю линию ординат; по размеру *ac*, равному величине амплитуды первоначальной неуравновешенности («пуск без груза»), устанавливают начало координат; точки перегиба кривой *b* и *d* должны отстоять друг от друга по окружности на 180°. Для проверки служит окружность (см. рис. 130, *б*), разделенная на восемь равных частей; деления окружности, соответствующие точкам *3* и *7* кривой, должны расположиться на этой окружности диаметрально противоположно.

Из кривой видно, что наибольшее уменьшение амплитуды колебания балансировочной опоры происходит тогда, когда пробный груз *P* укреплен в точке *3*. В этом случае амплитуда первоначальной неуравновешенности *ac* уменьшается на величину *ab* и становится равной величине *bc*. Таким образом, ясно, что в данном случае балансировочный груз должен быть укреплен в точке *3*. Так как амплитуда колебаний практически прямо пропорциональна величине груза, то для снижения амплитуды колебаний до нуля уравновешивающий груз должен быть больше проб-

ного груза P в отношении $ac : ab$, т. е. в точке *3* необходимо укрепить груз массой

$$Q = P\frac{ac}{ab},$$

где P — масса пробного груза в г;

ac и ab — соответствующие значения отрезков ординат по графику.

Масса балансировочного груза Q может быть также посчитана по формуле

$$Q = P\frac{A_{max} + A_{min}}{A_{max} - A_{min}},$$

где A_{max} и A_{min} — максимальная и минимальная амплитуды колебаний головки балансировочного станка при резонансной частоте вращения.

6. Укрепив груз Q в делении *3* и получив удовлетворительные результаты, приступают к балансировке другого конца ротора (сторона *Б*); у балансировочной опоры стороны *А* болты *1* и *2* (см. рис. 129, *а*) зажимают, а у стороны *Б* (см. рис. 131) — освобождают. Определение уравновешивающего груза Q_1 производится так же как и груза Q. Если груз Q_1 укрепить в соответствующей точке на роторе (точка укрепления груза Q_1 определяется из графика, построенного для этой стороны), то неуравновешенность со стороны *Б* будет устранена и ротор при закрепленной опоре *А* будет в равновесии.

Практика и теоретическое рассмотрение процесса динамической балансировки показывают, что, если после балансировки той или другой стороны разогнать ротор при обоих освобожденных подшипниках, ротор снова обнаружит признаки неуравновешенности, в виде вибрации подшипников. Это объясняется тем, что уравновешивающий груз Q_1, подвешенный со стороны подшипника *Б*, не только уравновешивает силы, действующие на подшипник *Б*, но и нарушает равновесие ранее уравновешенного конца *А*. Поэтому для уравновешивания первой стороны ротора *А* снова необходимо введение какого-то дополнительного груза *У*, который мог бы компенсировать действие груза Q_1 на подшипник *А*.

Установку этого груза на стороне *А* следует выполнить диаметрально противоположно грузу Q_1. В свою очередь, добавочный груз *У* будет влиять на подшипник *Б* и, следовательно, к грузу Q_1 надо будет добавить дополнительный груз, заменив груз Q_1 грузом X, который уравновесил бы полностью сторону *А*.

Величины грузов *У* и X определяют из следующих соображений. Обозначив центробежные силы от грузов *У*, Q_1 и X соответственно C_1, C_2 и C_3, будем иметь

$$C_1 = \frac{У}{g}\omega^2 R; \quad C_2 = \frac{Q_1}{g}\omega^2 r; \quad C_3 = \frac{X}{g}\omega^2 r; \qquad (1)$$

Из уравнения статики имеем

$$C_2 n = U_Б l \quad \text{или} \quad U_Б = \frac{C_2 n}{l}. \tag{2}$$

Для уравновешивания ротора при обоих освобожденных подшипниках необходимо, чтобы равнодействующая центробежных сил добавочного груза *У* и скорректированного груза *X* была равна по величине и прямопротивоположна по направлению силе $U_Б$ и приложена к подшипнику *Б* и чтобы действие центробежных сил от грузов *У* и *X* на подшипник *А* равнялась нулю.

При таком условии имеем

$$C_3 = C_1 + U_Б \quad \text{или} \quad C_3 - C_1 = U_Б; \tag{3}$$

$$C_1 d = U_Б a.$$

Решая уравнение (3) относительно C_1 и подставив значение $U_Б$ из уравнения (2), получим

$$C_1 = \frac{U_Б a}{d} = C_2 \frac{an}{dl}, \tag{4}$$

$$C_3 = U_Б + C_1 = C_2 \frac{mn}{dl}. \tag{5}$$

Подставляя в формулы (4) и (5) вместо C_1, C_2 и C_3 их значения из формул (1), получим

$$\frac{У}{g} \omega^2 R = \frac{Q_1}{g} \omega^2 r \frac{an}{dl}$$

$$\frac{X}{g} \omega^2 r = \frac{Q_1}{g} \omega^2 r \frac{mn}{dl},$$

откуда

$$У = Q_1 \frac{an}{dl} \cdot \frac{r}{R}; \quad X = Q_1 \frac{mn}{dl}.$$

Значения *a*, *n*, *m*, *d*, *l*, *r*, *R* схематически указаны на рис. 131. Фактические их величины определяются чертежами.

Грузы *Q* и *У* могут быть заменены одним грузом; для этого их следует сложить геометрически и полученный равнодействующий груз *Z* укрепить на роторе.

Результаты балансировки проверяют, установив грузы *X*, *Q* и *У* (или *X* и *Z*) при обоих освобожденных подшипниках. Известно, что отбалансировать ротор таким образом, чтобы амплитуды колебания опор равнялись нулю, невозможно. Достигаемая точность ограничивается точностью всей установки, измерений и рядом других причин. Поэтому обычно добиваются минимально достижимой амплитуды, величина которой устанавливается практически для каждого из типов балансируемых роторов.

Контроль точности балансировки заключается в том, что определенной величины груз (контрольный груз) закрепляется в точке приложения уравновешивающего груза и производится пробный пуск ротора. Если контрольный груз дает удвоение амплитуды, балансировка считается качественной. Правильность такого способа контроля подкреплена практикой и основана на известной пропорциональности амплитуд и действующих на ротор неуравновешенных масс. Если получено удвоение амплитуды при контрольном пуске, то можно считать, что остаточная неуравновешенность, вызываемая появлением минимальной амплитуды колебания, не превышала веса контрольного груза.

Величина контрольного груза подсчитывается исходя из предположения, что остаточная сила инерции, действующая на подшипник, не должна превышать 0,5% от веса балансируемого ротора:

$$U_{\min} = 0{,}005;$$

одновременно

$$U_{\min} = \frac{H_{\min}}{g}\omega^2 r \frac{n}{l},$$

где $H_{\min}$ — условный груз, центробежная сила которого G окажет на подшипник действие, равное $U_{\min}$;

n и l — расстояния до опор.

Контроль балансировки производится с обеих сторон ротора.

Ряд других методов балансировки освещен в специальной литературе [6]. Балансировка по методу трех пусков, применяемая на Ленинградском металлическом заводе им. XXII съезда КПСС, освещена в работах [4, 7].

Ротор, хорошо отбалансированный на станке (т. е. при низкой частоте вращения), в некоторых случаях может оказаться неуравновешенным при рабочей частоте вращения. Указанное явление особенно часто наблюдается в роторах длиной в несколько метров.

Такой длинный ротор, уравновешенный при балансировке на станке подвеской грузов на торцах ротора, может иметь значительный дефицит массы около его середины. Центробежные силы, возникающие из-за наличия дефицита массы в средней части ротора, могут вызвать упругий прогиб вала, который и приведет к неуравновешенности турбины в процессе ее работы. Этот пример показывает на необходимость дальнейшего совершенствования балансировочной техники, особенно при изготовлении современных мощных турбин с роторами большой длины.

В связи с внедрением в производство современных быстроходных турбин, представление о роторах как об абсолютно жестких телах оказывается недостаточным, так как при этом не учитываются изменения формы упругой линии ротора после прохождения им критических скоростей.

Для того чтобы гибкий ротор спокойно проходил через критические скорости и имел безвибрационное вращение на рабочей скорости, его необходимо уравновешивать по специальной методике в нескольких плоскостях и, кроме того, производить контрольное вращение в условиях, аналогичных эксплуатационным. Поэтому на практике возникает вполне обоснованное желание производить балансировку и разгон роторов на одной и той же машине, для того чтобы сэкономить время на дополнительную установку и транспортировку роторов.

Конечно, балансировочная машина, на которой ротор будет проходить критическую скорость, должна отличаться устойчивостью и жесткостью конструкции и иметь ряд специальных устройств. Однако соединение в одном агрегате балансировочного и разгонного устройств является все же целесообразным, тем более, что балансировка гибкого ротора должна на практике производиться дважды: до и после разгона.

Конструкция балансировочных машин для уравновешивания гибких роторов и методика этого уравновешивания тесно связаны с теорией изгибных колебаний роторов. Если в прошлом теория изгибных колебаний валов разрабатывалась главным образом в направлении изучения критических скоростей, то, начиная с пятидесятых годов, появляются работы, в которых рассматриваются поперечные колебания валов во время балансировочного процесса на балансировочной машине или непосредственно на месте установки. При этом во внимание принимаются не только трение и зазоры в подшипниках, но также их упругость, количество тел качения, сопротивление воздуха и другие факторы, оказывающие влияние на точность измерения дисбалансов ротора. Большой практический интерес представляет также процесс прохождения неуравновешенным ротором критических скоростей во время пуска или торможения машины.

Все эти задачи, имеющие непосредственное отношение к уравновешиванию гибких роторов, в настоящее время еще полностью не разрешены. Поэтому применяемые на практике методы уравновешивания роторов имеют эмпирический, приближенный характер и дают удовлетворительные результаты лишь для тех категорий роторов, применительно к которым они разрабатывались и проверялись экспериментально.

Глава XI. СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ МУФТЫ

Соединительные муфты предназначены для соединения между собой двух роторов и более и для передачи крутящего момента от отдельных роторов турбины к ротору машины, приводом которой они являются (например, к ротору генератора, насоса, компрессора и т. п.).

В стационарном турбиностроении наиболее широко применяются муфты жесткие (рис. 132, *а*, *б*), гибкие (рис. 132, *в*), допускающие некоторое относительное смещение соединяемых роторов в радиальном и осевом направлениях, и полугибкие (рис. 132, *г*). Конструктивное выполнение гибких муфт бывает самое разнообразное. Зубчатые муфты показаны на рис. 133, *с*, кулачковые — на рис. 133, *б*, пружинные — на рис. 132, *в*.

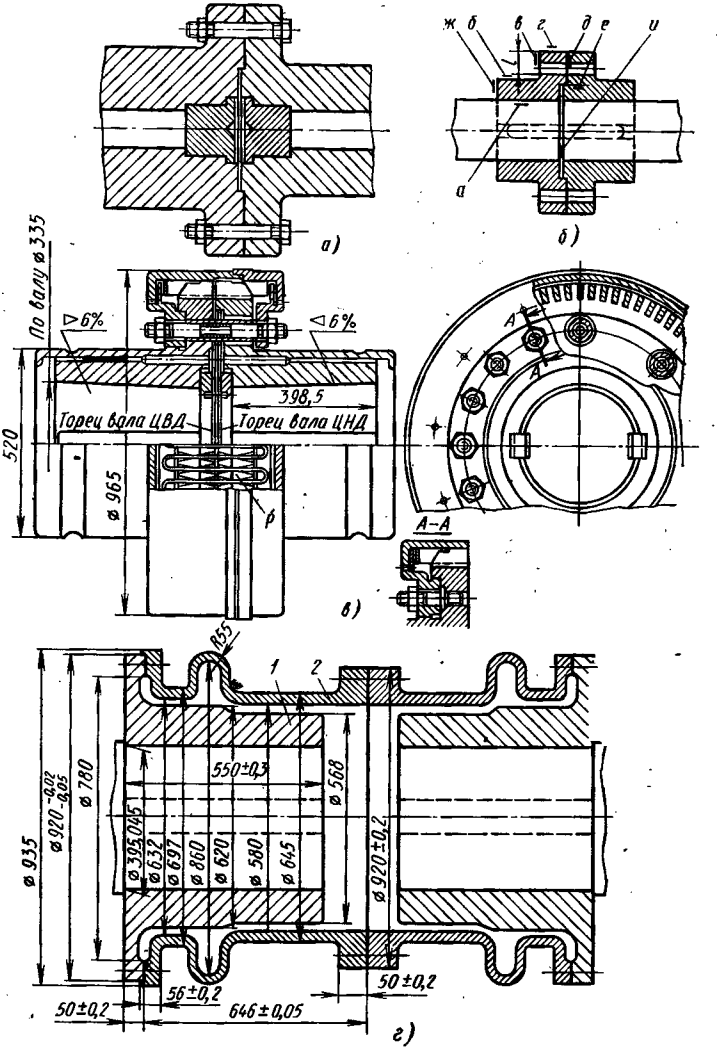


Рис. 132. Конструкция соединительных муфт:
а — жесткая; *б* — жесткая разъемная; *в* — гибкая; *г* — полугибкая; *1* — полумуфта; *2* — соединительная часть

Материалами для изготовления муфт обычно служат хромомолибденовые и хромоникелемолибденовые стали 34ХМА, 35ХМ, 34ХН1М и 34ХН3М. Заготовки деталей соединительных муфт поступают обычно в виде поковок, которые затем подвергают механической обработке и тем же контрольным и термическим операциям, что и валы (травлению на флокены, взятию серных отпечатков, закалке и отпуску с проверкой механических свойств).

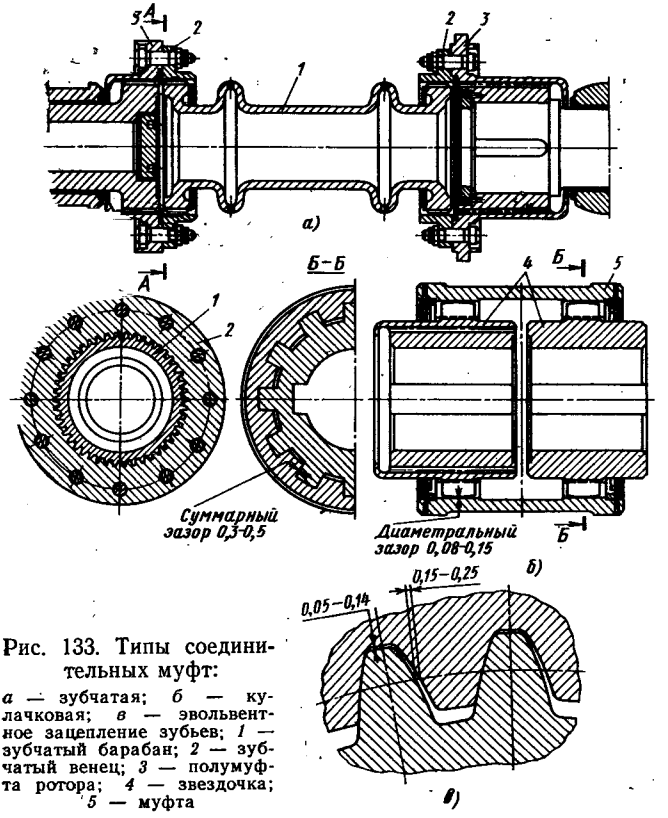


Рис. 133. Типы соединительных муфт:

а — зубчатая; *б* — кулачковая; *в* — эвольвентное зацепление зубьев; *1* — зубчатый барабан; *2* — зубчатый венец; *3* — полумуфта ротора; *4* — звездочка; *5* — муфта

Муфты служат проверочными базами при центровке роторов, в эксплуатации они испытывают большие напряжения, поэтому к качеству изготовления деталей муфт предъявляются весьма высокие требования.

Основными требованиями к качеству муфт являются следующие:

а) для жестких муфт, изготовленных заодно с валом: торцовое биение фланцев муфты допускается не более 0,02 мм; радиальное биение по центрирующему выступу (и выточке) — не более 0,02 мм; по наружному диаметру фланца относительно оси —

0,03 мм; точность выполнения размеров наружного диаметра фланца муфты и отверстий в ней — по 2-му классу, центрирующей выточки фланца — по 3-му; чистота обработки цилиндрических поверхностей фланца, выступа и выточки — по 7-му классу чистоты, торцовой поверхности фланца — по 6-му классу.

б) для жестких муфт с насадными деталями: после насадки полумуфты на вал ротора требуется проверка правильности посадки на биение на токарном станке с выдерживанием требований, указанных выше; при конусной посадке полумуфты на вал ротора, для конусности в 0,5%, допускается отклонение конусности ±0,05% и чистота обработки конца вала по 7—8-му классам чистоты (пригонка конусной части производится по краске); шпоночные соединения должны выполняться в части ширины паза по 3-му классу точности: непараллельность граней паза между собой и по отношению к оси должна составлять 0,03—0,04 мм. Такая высокая точность определяет необходимость пригонки шпоночных пазов в валу и в полумуфте в сборке; натяг при посадке полумуфты на конусный конец вала должен составлять 0,25—0,36 *мм*.

При изготовлении гибких муфт требуется выдержать следующее дополнительное требование. С целью обеспечения надежной передачи крутящего момента соблюсти должный контакт в зацеплении, что достигается пригонкой; при изготовлении пружинных муфт требуется тщательное соблюдение конструктивных требований к качеству самих пружин и пазов под пружины, чтобы обеспечить одновременную работу всех витков пружины и для равномерного распределения между ними нагрузки от крутящего момента. Детали соединительных муфт представляют собой тела вращения и основным видом обработки для них является точение на токарных и карусельных станках.

Рассмотрим в качестве примера технологический процесс обработки полумуфты. Анализ поверхностей, образующих конструктивные формы полумуфты, показывает, что наиболее ответственными из них являются: а) отверстие, определяющее положение самой полумуфты на валу ротора, а следовательно, и положение всех остальных поверхностей относительно оси ротора; б) торец фланца и наружный диаметр центрирующего выступа, определяющие положение присоединяемых частей; в) наружняя поверхность фланца, являющаяся базой для центровки роторов по полумуфтам.

Выполнение высоких требований по биению поверхностей полумуфты относительно оси вала возможно только при обработке всех ответственных поверхностей полумуфты с одной установки, т. е. без смены баз. Поэтому чистовая обработка полумуфты (например, см. рис. 132, *б*) выполняется в следующей последовательности. Заготовку поверхностью *б* зажимают в патрон станка, подрезают торцовую поверхность *д* и начисто обрабатывают наружные и внутренние поверхности *а*, *е*, *и*, *г*, а также *в* на неко-

торой длине *l*. Затем производят перестановку детали в патроне станка. Установочными базами при точении на оправке служат поверхности *д* и *е*, а при точении без оправки — поверхность *д* с выверкой установки индикатором по поверхностям *а* и *в*. Заканчивается токарная обработка проточкой поверхностей *ж*, *б* и оставшейся необработанной при первой установке части поверхности *в*.

После окончания токарной обработки на долбежном станке производят обработку шпоночного паза. Выверку при установке производят с помощью индикатора по поверхности *д*. Сверление отверстия под соединительные болты выполняют по кондуктору с центровкой его по поверхности *е*. В отверстиях под соединительные болты оставляется припуск *и* (1—2 мм на диаметр) для обработки их при сборке роторов.

Заключительной станочной операцией при обработке зубчатых муфт является нарезание зубьев, а в пружинных муфтах — пазов под пружины. В том и другом случае заготовка укрепляется на приспособлении с центровкой по отверстию в качестве установочной базы. Измерительными базами служат наружная цилиндрическая и одна из торцовых поверхностей. Точность установки 0,015—0,02 мм. Точность шага зубьев у зубчатых муфт определяется точностью зуборезного станка. После нарезания зубьев контакт с сопрягаемой деталью проверяется на специальном приспособлении.

Прорезание пазов под пружины производится с помощью специального делительного приспособления. Для получения ромбической формы выступов (см. *Р* на рис. 132, *в*) стол приспособления устанавливается наклонно. Прорезка пазов производится в два прохода: первый справа, второй — слева.

Окончательно обработанные торцовую и внутреннюю цилиндрическую поверхности вторично подвергают травлению на флокены и с них снимают серные отпечатки; затем места заготовки, подвергавшиеся травлению, заполировывают. Заключительной операцией является слесарная обработка с целью зачистки острых кромок и заусенцев.

Глава XII. ГРЕБЕНЧАТЫЕ УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ВТУЛКИ

Гребенчатые уплотнительные втулки (рис. 134) являются частью концевых лабиринтовых уплотнений. Они насаживаются на вал ротора в горячем состоянии на шпонках с натягом около 0,2 мм при диаметре вала 400—600 мм. Втулки имеют на наружной поверхности гребешки разной высоты, расположенные с определенным шагом.

В новейших высокотемпературных турбинах в роторах высокого и среднего давлений от применения втулок, насаженных на

вал, отказались. При такой конструкции наблюдалось ослабление посадки втулок на вал в процессе пуска из-за большой разницы температур втулки и вала, что приводило к разрушению лабиринта. Поэтому в конструкциях турбин с высокими параметрами пара выступы вытачиваются непосредственно на валу турбины. Насадные втулки применяются для турбин невысоких параметров и в роторах низкого давления современных мощных турбин с высокими параметрами пара. Характер конструкции уплотнений также изменился. Концевые уплотнения роторов НД состоят из наклонных усиков, выточенных на насадных втулках,

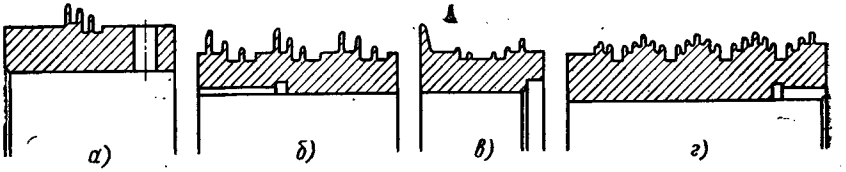


Рис. 134. Типы гребенчатых втулок:
а — втулка турбины П-165; *б* — втулка турбины АТ-25-2; *в* — втулка турбины низкого давления; *г* — втулка ротора низкого давления турбины АТ-25-2

и уплотнительных колец с наклонными усиками в обоймах статора. Такие уплотнения не уступают по экономичности лабиринтовым (требующим больших шагов) и полностью исключают возможность задевания при относительных смещениях ротора и статора.

Наиболее сложный профиль имеют гребенчатые втулки «елочных» уплотнений. Поэтому ниже, в качестве примера, рассматривается технология обработки именно таких втулок. В качестве материала для гребенчатых втулок обычно применяется сталь 34ХМА; при температурах пара до 500° С — сталь 25ХМФ. Заготовки втулок подвергают тем же контрольным и термическим операциям, что и заготовки валов.

К механической обработке гребенчатых втулок предъявляются следующие требования: а) неконцентричность наружных диаметров гребешков и расточки втулки необходимо выдерживать в пределах допусков на соответствующие размеры диаметров гребешков; б) толщину гребешков необходимо выдерживать с точностью до 0,05 мм; в) допускаемое отклонение расстояний гребешков от торцовой плоскости не должно превышать ±0,05 мм; г) конусность и овальность отверстий не должна превышать 0,02 мм; д) биение по наружным поверхностям зубцов относительно расточки — не более 0,08 мм; е) овальность наружных поверхностей зубцов допускается в пределах 50% допусков на размеры диаметров; ж) биение торцовой плоскости относительно оси расточки допускается не больше 0,05 мм; з) чистота обработки поверхности отверстия по 6-му классу, остальные поверхности — по 5-му классу.

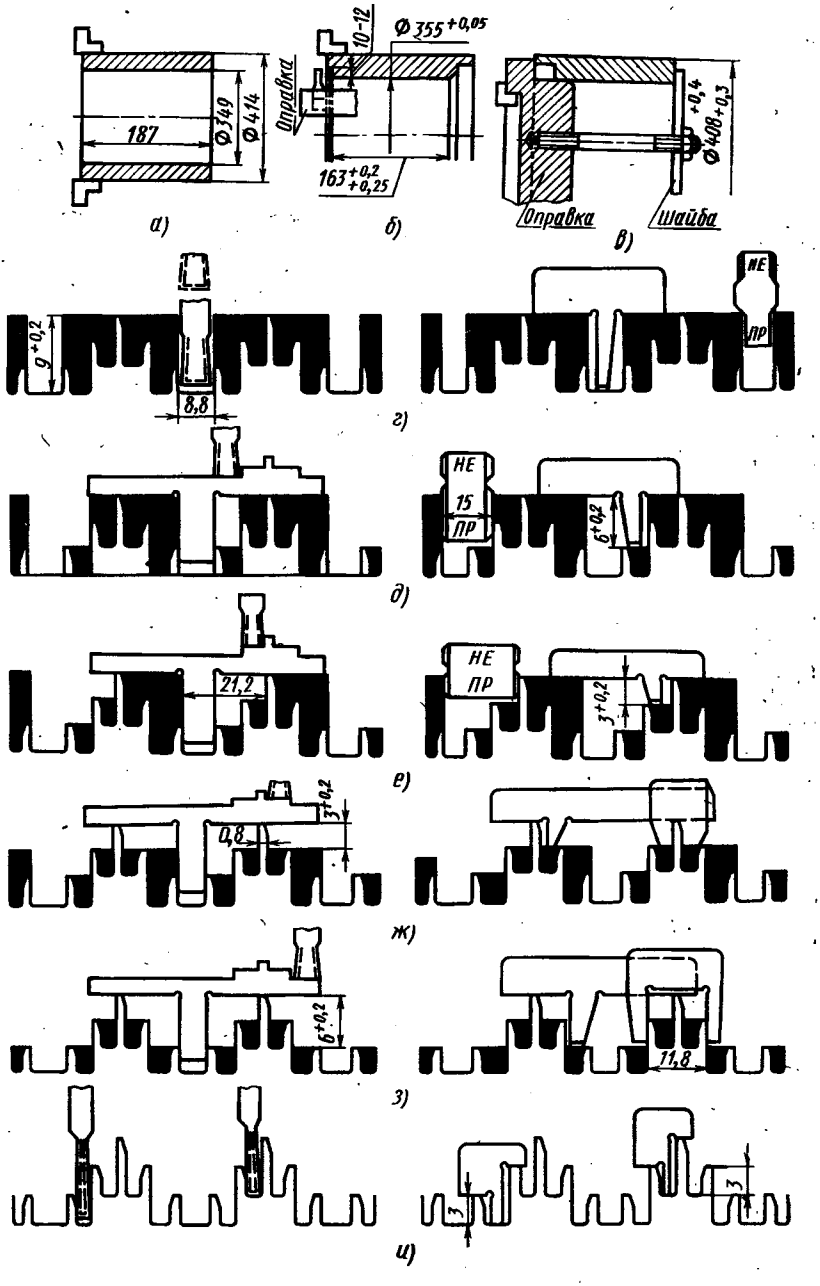


Рис. 135. Схема обработки гребенчатой втулки:

а — в — последовательность переходов обработки втулки до формообразования профиля; *г — и* — последовательность переходов обработки профиля втулки

Гребенчатая втулка предварительно обрабатывается с припуском по 3 мм на сторону, а затем передается на термическую обработку для снятия напряжений. На рис. 135 показана последовательность обработки втулки. После термической обработки втулку зажимают в кулачки патрона (рис. 135, *а*) и окончательно обрабатывают отверстие и один торец. Вторую торцовую плоскость со стороны кулачков подрезают на глубину 10—12 мм при помощи оправки с резцом (рис. 135, *б*). В связи с опасностью пережима втулки кулачками патрона окончательную обработку отверстия рекомендуется вести на карусельном или токарном станке с креплением не в кулачках, а на планшайбе с прижимом планками в торце втулки.

Для прорезки гребешков втулку центрируют на короткой оправке по отверстию (рис. 135, *в*), крепят шайбой, уложенной на передний торец, и шпилькой, ввинченной в оправку. Диаметр шайбы не должен превышать диаметра переднего торца. Сама оправка крепится в кулачках. Гребешки втулки имеют повторяющиеся впадины различных аксиальных размеров. Прорезку впадин проводят в два прохода, оставляя на последний проход припуск по 1 мм на сторону. При прорезке пазов аксиальные размеры выдерживают по упорам, ориентируясь на торцовую плоскость. Глубину канавок устанавливают по нониусу или по упорам с проверкой шаблоном и предельной пробкой.

В некоторых втулках отдельные гребешки, имеющие максимальный размер, не повторяются, что затрудняет использование шаблона, так как нет второй опорной базы для него. В этом случае на расстоянии шага, т. е. повторяющегося профиля, ближайший гребешок оставляют на высоте, равной высоте наибольшего гребня. Таким образом, искусственно создается вторая опора для шаблона. После окончательной обработки гребешков эту опору срезают. Диаметры впадин проверяют микрометрической скобой со специально вставленными ножками.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ
ОБРАБОТКА КРУПНЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАТОРА

Глава XIII. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТАТОРАХ ТУРБИН, НАЗНАЧЕНИЕ И УСЛОВИЯ ИХ РАБОТЫ

Статором называется комплекс всех неподвижных частей турбины, состоящий из корпусов турбины и подшипников, а также неподвижных деталей проточной части — сегментов, сопел, обойм диафрагм, уплотнений — непосредственно взаимодействующих с вращающимся ротором.

Статор играет роль базирующей части турбины, с помощью которой соединяется и координируется, в пределах необходимой для работы турбины точности, большинство ее узлов и деталей. Основными деталями статора являются корпусы цилиндров и подшипников с фундаментными рамами, воспринимающие все статические и динамические нагрузки работающей турбины.

Корпусы цилиндров и подшипников соединены между собой системой шпоночных связей, обеспечивающих их надежное центрирование между собой и свободное тепловое расширение элементов работающей турбины, без нарушения центровки.

Особое внимание при изготовлении деталей статора уделяется обработке опорных плоскостей цилиндров и корпусов подшипников и сопряжению их с плоскостями фундаментных рам. Отклонение от правильной геометрической формы этих плоскостей приведет к расцентровке турбины при тепловом расширении в процессе ее работы.

Наиболее ответственными деталями статора являются корпусы цилиндров (цилиндры турбины). Цилиндры турбины работают в исключительно тяжелых условиях с очень большими температурными перепадами. Так, например, в цилиндре среднего давления турбины К-300-240 ЛМЗ разность температур в передней и задней частях цилиндра доходит до 540° С. В современных стационарных газовых турбинах температура в передней части доходит до 800° С (и более), а в части низкого давления — лишь до 300—350° С.

Цилиндры высокого давления некоторых турбин, например СКР-100 ХТГЗ, подвергаются действию пара с давлением до 3000 Н/см² (300 кгс/см²) и температурой до 650° С, а цилиндры

низкого давления в то же время находятся под вакуумом до 0,3 Н/см² (0,03 кгс/см²) при температуре 50—60° С. Наличие в корпусах турбин горизонтальных и вертикальных разъемов требует обеспечения хорошей герметичности цилиндров для предотвращения «пропаривания» разъемов в зоне высоких давлений или подсоса воздуха внутрь цилиндра в зоне вакуума.

Большое внимание при обработке цилиндров следует уделять качеству опорных поверхностей, к которым прижимает пар обоймы и диафрагмы внутри цилиндра. Неудовлетворительное состояние этих поверхностей приводит к внутренним неплотностям, повышению внутренних потерь, снижению к. п. д. турбины.

Разновидность конструкций цилиндров паровых и газовых турбин, выпускаемых различными заводами, определяется в основном разным назначением турбин. Технические требования к производству и сборке цилиндров и других деталей статоров турбин подробно рассматриваются ниже.

Глава XIV. КОРПУСЫ ЦИЛИНДРОВ ТУРБИН

1. Особенности конструкции и технологичность корпусов

Характерной особенностью конструкции корпусов цилиндров и подшипников турбин является наличие у них разъемов в горизонтальной плоскости. У корпусов цилиндров турбины в части низкого давления обычно имеются разъемы также и в вертикальной плоскости. Горизонтальный разъем делит каждый корпус на верхнюю и нижнюю половины, обеспечивая, таким образом, возможность сборки корпусов подшипников с вкладышами и корпусов цилиндров с деталями проточной части — обоймами, диафрагмами, ротором.

В зависимости от назначения, мощности и параметров рабочей среды корпусы турбин могут быть различными по конструкции и форме. Мощность турбин влияет на габаритные размеры, а параметры рабочей среды — на выбор марок материалов, конструктивных форм и толщин стенок корпусов. Постоянное повышение параметров пара и газа, развитие регенерации и рост мощностей в одном агрегате, сопровождаются увеличением размеров цилиндров, усложнением их конструктивных форм и применением высоколегированных специальных сталей.

Вследствие сложности конструктивных форм как внутренних, так и наружных поверхностей цилиндров при наличии паровых каналов, не подвергаемых механической обработке, наиболее технологичным видом заготовок для цилиндров (кроме крупных выхлопных частей) являются отливки.

При разработке конструкций турбин необходимо тщательно учитывать все особенности технологии литья и последующей механической обработки корпусов. Для применения наиболее целесообразных технологических процессов при изготовлении заготовок и их дальнейшей обработке необходимо, чтобы спроектированные корпусы при обеспечении требуемых эксплуатационных качеств были бы наиболее удобными, простыми и экономичными в производстве, т. е. удовлетворяли бы основным требованиям технологичности.

Для обеспечения качества и производительности процесса механической обработки корпусы турбин должны иметь хорошие технологические базы и места для надежного крепления их на станках. При отсутствии у корпусов конструктивных поверхностей (в виде, например, паровпускных и паровыпускных патрубков с фланцами), которые могут быть приняты за базы для установки и крепления корпусов на станках, необходимо предусматривать специальные технологические приливы или площадки. Наличие базовых площадок, обработанных с одной установки на первой операции, обеспечит высокую точность выполнения последующих операций на основе сохранения единства баз и, как следствие, снижения величины накопленных ошибок при переустановках обрабатываемых деталей на станках. Форма и расположение технологических приливов и площадок должны быть типовыми и тем обеспечивать условия для создания универсальных установочных устройств, позволяющих надежно и без деформаций крепить корпусы для их обработки и применять высокие режимы резания.

Если нельзя сделать простые формы корпусов по условиям протока пара, корпусы турбин целесообразно изготовлять сварными или сварно-литыми. Такие корпусы состоят из отдельных более мелких и простых отливок или из комбинаций литых и кованых деталей, предварительно обработанных под сварку. В качестве примера ниже (см. рис. 140) показана верхняя половина сварно-литого корпуса цилиндра высокого давления (ЦВД) с приваренными сопловыми и паровыми коробками.

Для обеспечения необходимой плотности стыков фланцы горизонтального разъема корпусов должны иметь значительную толщину. Так, например, в паровой турбине СКР-100 толщина фланцев наружного ЦВД составляет 550 мм. При этом по конструктивным соображениям толстые фланцы сопрягаются непосредственно с относительно тонкими стенками, что вызывает большие трудности в литейном производстве из-за образования пороков литья, обычно сосредоточенных в местах перехода от фланцев к стенкам. В эксплуатации турбин эта особенность конструкции цилиндра также вызывает затруднения, сказывающиеся на замедлении процесса прогрева машины перед пуском, так как толстые фланцы прогреваются значительно медленнее тонких стенок, а разность температур

отдельных участков корпуса во избежание его коробления нельзя допускать более чем до 30° С.

Для уменьшения толщины фланцев горизонтального разъема и толщины стенок корпусов применяются двухстенные конструкции цилиндров, т. е. создаются наружный и внутренний корпусы. Это позволяет снизить разность давлений, действующих на каждый корпус, и повышает тепловую эластичность цилиндра в целом. В качестве примера можно привести цилиндр высокого давления паровой турбины К-300-240. Применение двухкорпусной конструкции дает возможность упростить

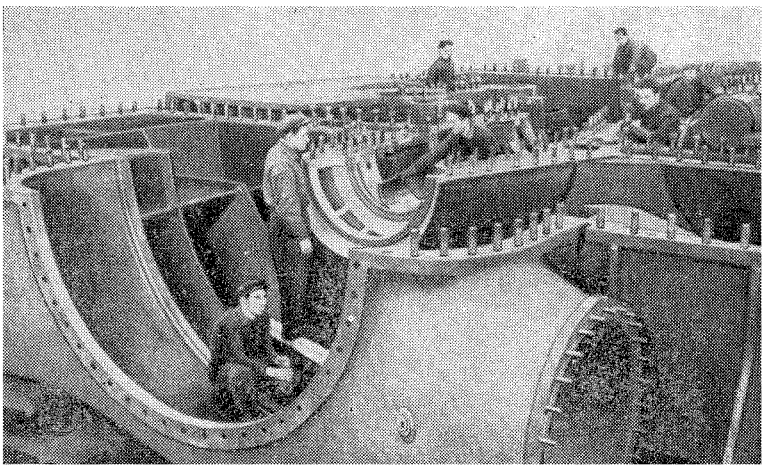


Рис. 136. Цилиндр низкого давления турбины ПВК-300

форму каждого из корпусов и облегчить производство отливок.

Повышение литейной технологичности корпусов достигается также и за счет установки диафрагм не непосредственно в цилиндр, а при помощи обойм, как это сделано, например, в турбине АП-25-2, хотя это и ведет к некоторому увеличению трудоемкости механической обработки и сборки.

В литых корпусах, имеющих карманы или глухие камеры, как например, в сопловых коробках турбины К-300-240, следует предусматривать технологические отверстия для очистки внутренних поверхностей этих карманов от формовочной земли, пригаров и литейных неровностей. При химической очистке литья эти отверстия используются для контроля качества очистки.

Цилиндры низкого давления (ЦНД) современных мощных турбин имеют большие габаритные размеры и вес. Например,

размеры только нижней половины выхлопной части ЦНД турбины К-300-240 составляют 9840 × 9000 × 2900 мм. Поэтому, несмотря на то, что действующие напряжения в выхлопных частях ЦНД и температурные условия при эксплуатации позволяют применить для таких цилиндров чугунное литье, изготовляют их все же сварными из литых и листовых заготовок. На рис. 136 хорошо видны литая передняя часть и сварная выхлопная часть ЦНД. Изготовление таких крупных корпусов сварными вместо литых объясняется нетехнологичностью их в литом исполнении. При литом исполнении пришлось бы значительно увеличивать толщину стенок и габариты. Цилиндр получился бы очень громоздким и тяжелым.

Производство больших литых чугунных цилиндров из-за дефектов литья и трудностей их исправления не представляется возможным.

2. Материалы для корпусов турбин и виды заготовок

При работе турбины корпус испытывает высокие механические и температурные напряжения и подвергается коррозионному и эрозионному воздействию рабочей среды. Корпусы турбин изготовляются литыми, сварными, сварно-литыми и иногда коваными или штампованными, например для газовых турбин.

Выбор марки материала для цилиндров турбин определяется температурой рабочей среды. Важным критерием являются также благоприятные технологические свойства данного материала соответственно принятому виду заготовок. Для литых корпусов материал должен обладать хорошими литейными свойствами, т. е. хорошей жидкотекучестью, небольшой усадкой, малой склонностью к трещинообразованию и пленообразованию и небольшой чувствительностью к различным скоростям охлаждения как после выбивки отливок из опок, при повышенных температурах, так и в готовых изделиях; материал должен также надежно сохранять определенные механические свойства как при комнатной, так и при рабочей температурах. Для сварно-литых корпусов важным критерием является свариваемость.

Материалы корпусов должны хорошо обрабатываться на металлорежущих станках.

Распространенным и дешевым материалом для отливок является серый чугун, из которого могут изготовляться корпусы турбин, работающие под умеренным давлением в зоне невысоких температур. Высшим пределом, до которого может быть использован чугун повышенного качества, следует считать температуру 250° С при давлении до 200 Н/см² (20 кгс/см²). Под влиянием высокой температуры происходит «рост» чугуна. Чугун постепенно изменяет структуру и увеличивает свой объ-

ем. Этот процесс идет тем быстрее, чем чаще меняется температура и чем она выше. Увеличиваясь в объеме, отливка становится «рыхлой», и прочность ее значительно уменьшается.

Для корпусов турбин применяются чугуны марок СЧ 21-40 и СЧ 28-48 по ГОСТ 1412—70. Общие требования к качеству чугунного литья состоят в обеспечении нормальной структуры материала, отсутствия раковин, шлаковых включений и неплотностей. В соответствии с температурными условиями работы турбин из чугуна можно изготовлять выхлопные части малых турбин, корпусы осевых компрессоров газовых турбин, корпусы подшипников, фундаментные рамы.

При рабочих температурах свыше 250° С для изготовления литых корпусов применяются углеродистые и легированные стали. Марки наиболее распространенных в турбиностроении литейных сталей, их механические свойства и температуры применения указаны в табл. 19.

Таблица 19

Марки некоторых литейных сталей, применяемых для изготовления корпусов турбин

Марка стали	Предел прочности		Относительное удлинение δ_5 в % (не менее)	Относительное сужение ψ в % (не менее)	Температура применения T в °С
	в Н/мм²	в кгс/мм²			
25Л	450	45	19	30	400—450
30Л	450	45	16	28	400—450
35Л	500	50	15	25	450—500
ХН35ВТ	750	75	15	35	650—680

Для цилиндров газовых турбин, изготовляемых из аустенитных сталей, в нашей отечественной практике применяются (кроме указанных в табл. 19) стали ЛА1, 1Х18Н9Т и др. Стоимость стального литья для корпусных деталей турбин в значительной мере зависит от степени легирования сплава, сложности и веса отливок.

Металлургическими заводами — поставщиками литья, отливки сдаются термически обработанными, с механическими свойствами в соответствии с табл. 19. Прибыли, литники, литейные ребра должны быть обрублены. В отливках не допускаются трещины, видимые невооруженным глазом, раковины, пористость, рыхлость и посторонние включения. Выявление дефектов производится методами травления, керосиновой пробы, ультразвуковым дефектоскопом, проникающим излучением. Допустимые дефекты устанавливаются эталонами и техническими условиями. Поверхности отливок должны быть очищены от формовочной земли и окалины. Исправление литейных дефектов на заводе-поставщике допускается путем заварки (пос-

ле полного удаления дефектного металла) с указанием в паспорте, сопровождающем отливку, дефектных мест и их размеров. Завод-поставщик проводит контроль механических свойств отливки. Результаты испытания также указываются в паспорте отливки. В отливках из легированных сталей радиусные переходы и места питателей полируются и контролируются травлением.

Турбиностроительный завод производит повторно все механические испытания отливок и, кроме того, проверяет твердость по Бринелю в различных местах отливки, с целью выявления разброса механических свойств по всей заготовке.

Перед началом выполнения работ по механической обработке все отливки корпусов очищают, а затем их принимает представитель ОТК завода. Качество отливки определяется на основании результатов химического анализа плавки, механических испытаний, внешнего осмотра и обмера. В необходимых случях, где визуальный осмотр оказывается недостаточным, производят керосиновые испытания и травление отдельных мест.

Механические свойства материала отливки проверяют на образцах, изготовляемых из пробных планок, которые могут быть отлиты отдельно либо вместе с корпусом (в качестве приливов). Пробные планки для образцов должны проходить все виды операций термической обработки совместно с отливками корпусов.

Для определения механических свойств изготовляются следующие образцы: один для испытаний на растяжение, два — на ударную вязкость и один для испытания на изгиб.

Испытания на растяжение производятся на круглых образцах с расчетной длиной $l_0 = 5d_0$ (где d_0 — диаметр расчетной части образца) и конусным плавным переходом от головки образца к его стержню. Для определения ударной вязкости изготовляются образцы типа Менаже с размерами $10 \times 10 \times 55$ мм. Для пробы на холодной изгиб берут образцы размером $10 \times 20 \times 160$ мм.

При получении неудовлетворительных результатов хотя бы по одному из видов испытаний проверка по данному виду повторяется на двойном количестве образцов. При неудовлетворительных результатах повторного испытания, полученных хотя бы на одном образце, отливку корпуса подвергают повторной термической обработке вместе с пробными планками для образцов и вновь производят все установленные механические испытания.

Дефекты отливок исправляют методом заварки, которая должна быть выполнена до термической обработки отливки. Химический состав и механические свойства материала, наплавляемого при заварке, должны соответствовать нормам, установленным для материала отливки.

Для обнаружения скрытых дефектов отливки подвергают гидравлическим испытаниям, которые обычно производятся после окончательной обработки. Условия проведения гидравлических испытаний и их порядок оговариваются в чертежах на отливку. Обнаруженные при гидравлических испытаниях дефекты устраняют заваркой.

На каждой принятой отливке, на необрабатываемой наружной поверхности, зачищают шлифовальным кругом площадку (карточку) размером 120 × 80 мм, на которой ставится клеймо ОТК о приемке отливки, и указывают номера плавки, проб и чертежа отливки. На этой же карточке в дальнейшем клеймятся данные о результатах гидравлических испытаний.

Производить механическую обработку отливок до получения удовлетворительных результатов механических испытаний образцов не разрешается.

3. Основные технические требования к механической обработке корпусов

Статоры современных турбин состоят из нескольких частей, из которых основными — базирующими деталями турбин являются корпусы подшипников и цилиндры низкого давления с встроенными в них корпусами задних подшипников. Эти детали воспринимают на себя основные статические и динамические нагрузки и определяют требуемое положение турбины относительно фундамента.

Из всех поверхностей, образующих наружный и внутренний контуры всех частей цилиндров турбины, наиболее ответственными по своему служебному назначению и требующими особо тщательного выполнения являются: поверхности каналов подвода, распределения и отвода рабочей среды; внутренние расточки всех частей корпусов под установку вкладышей, обойм, диафрагм, уплотнений и опорные плоскости нижних половин цилиндров и корпусов подшипников. Исключения в этом случае составляют цилиндры высокого давления некоторых конструкций турбин, у которых опорные поверхности расположены на верхних половинах корпусов.

Технические требования к качеству механической обработки указанных поверхностей имеют целью обеспечить: высокие аэродинамические показатели тракта для протекания рабочей среды; возможность свободного теплового расширения каждой части корпуса во всех направлениях без нарушения их соосности; точное выполнение мест под установку и фиксацию деталей статора и ротора; необходимую плотность горизонтальных и вертикальных разъемов цилиндра; внутреннюю плотность по горизонтальным разъемам диафрагм и обойм, а также по прилеганию диафрагм и обойм к расточкам цилиндров и др.

От характера и точности соблюдения технических требований к обработке корпусов в значительной степени зависит надежность и экономичность турбины. Содержание основных технических требований к обработке корпусов указывается ниже.

Все поверхности отливок корпусов, не подвергающиеся механической обработке на станках, должны быть очищены от окалины дробеструйным аппаратом или другими методами. Поверхности, омываемые паром или маслом, подлежат наиболее тщательной очистке от литейных неровностей и окалины, до металлического блеска. Все внутренние необрабатываемые поверхности корпусов подшипников, омываемые маслом, после очистки необходимо покрывать маслостойкой краской.

Все плоскости горизонтальных и вертикальных разъемов обрабатываются шабрением, шлифованием, притиркой или любой другой финишной операцией так, чтобы при сборке, без применения каких-либо прокладок на разъемах, была обеспечена полная герметичность корпуса при номинальном давлении рабочей среды. Разъемы корпусов турбин высоких параметров пришабриваются по второму классу точности (12—17 пятен на площади 25 × 25 мм, с проверкой по слабо окрашенной плите); средних параметров — по третьему классу (7—11 пятен) и низких параметров — по четвертому классу (3—6 пятен). Проверка плоскости разъема контрольной плитой должна производиться у нижней части корпуса, как имеющей наибольшую протяженность; верхняя часть проверяется по нижней. Между сопрягаемыми плоскостями при затянутых болтах щуп толщиной 0,04 мм не должен проходить. У цилиндров части высокого давления, имеющие толстые фланцы, при свободном наложении одной части на другую без затяжки болтами зазор в разъеме не должен превышать 0,05 мм.

Отверстия для установочных (фиксирующих) болтов или штифтов должны быть выполнены по второму классу точности и 7—8-му классам чистоты поверхности. Риски и задиры на поверхностях отверстий не допускаются. Конусность и овальность допускаются в пределах половины поля допуска на обработку по второму классу точности. Чтобы предупредить задиры, между поверхностями установочных болтов (штифтов) и отверстий предусматривается зазор 0,01—0,02 мм, который обеспечивается шлифовкой болтов по замерам с места. Эти детали должны вводиться и выводиться из соответствующих отверстий легкими ударами медного молотка.

Расточки всех соединяющихся по вертикальному разъему частей корпуса должны быть соосными, и их общая ось должна находиться в плоскости горизонтального разъема корпуса. Несовпадение общей оси расточки корпуса с плоскостью горизонтального разъема допускается разными заводами в пределах от —0,1 до —0,25 мм. Конусность и овальность всех растачива-

емых поверхностей допускается в пределах половины поля допуска на диаметр.

Отклонение от перпендикулярности торцовых плоскостей в расточенной части корпуса к оси расточки допускается не более 0,08 мм на длине торца.

Непараллельность оси расточки корпуса относительно опорных фундаментных поверхностей допускается не более 0,10 мм на длине опор. Непараллельность шпоночных пазов, расположенных на опорных фундаментных поверхностях корпусов подшипников относительно оси расточки, допускается не более 0,05 мм на длине паза.

Отверстия с резьбой, расположенные на ответственных фланцах (плоскостей горизонтального и вертикального разъемов, плоскостей сопряжения с паровыми коробками и пусковыми клапанами и др.), должны быть выполнены с такой точностью, чтобы шпильки завинчивались в них достаточно туго.

4. Типовые конструкции корпусов и технологические схемы их обработки

Существующие конструкции корпусов турбин имеют большое разнообразие вследствие различия турбин по назначению (стационарные, судовые), виду энергоносителей (паровые, газовые), мощности и параметрам рабочей среды. Однако, несмотря на внешнее различие, общим для корпусов турбин является наличие горизонтального разъема, разделяющего корпус на верхнюю и нижнюю половины. Это создает принципиальную общность технологических процессов для всех корпусов турбин. Первой основной операцией механической обработки всех корпусов является обработка горизонтальных разъемов.

У большинства корпусов, а у корпусов турбин больших габаритов обязательно, кроме горизонтального разъема, имеются и вертикальные разъемы. На рис. 137 и 138 показаны две типичные конструкции корпусов паровых турбин: на рис. 137 — без вертикальных разъемов, на рис. 138 — с вертикальными разъемами. Второй корпус разделен на три части вертикальными разъемами *А* и *Б*, что сделано с целью уменьшения веса отливок, улучшения технологии их изготовления и упрощения механической обработки. Эти части представляют собой технологические узлы. Первый узел состоит из деталей *1* и *4*; второй — из деталей *10* и *16*; третий — из детали *11*, *13* и *14*. Обоймы также являются технологическими узлами и состоят каждая из двух частей: *2* и *3*; *5* и *20*; *6* и *19*; *7* и *18*; *8* и *17*; *9* и *15*.

Корпусы, аналогичные корпусу, показанному на рис. 138, в собранном виде почти никогда не обрабатываются. Каждая из частей корпуса, т. е. соединенные детали *1* и *4*; *10* и *16*; *11*, *13* и *14* подаются на сборку корпуса после полной механической обработки, произведенной независимо от других частей корпуса.

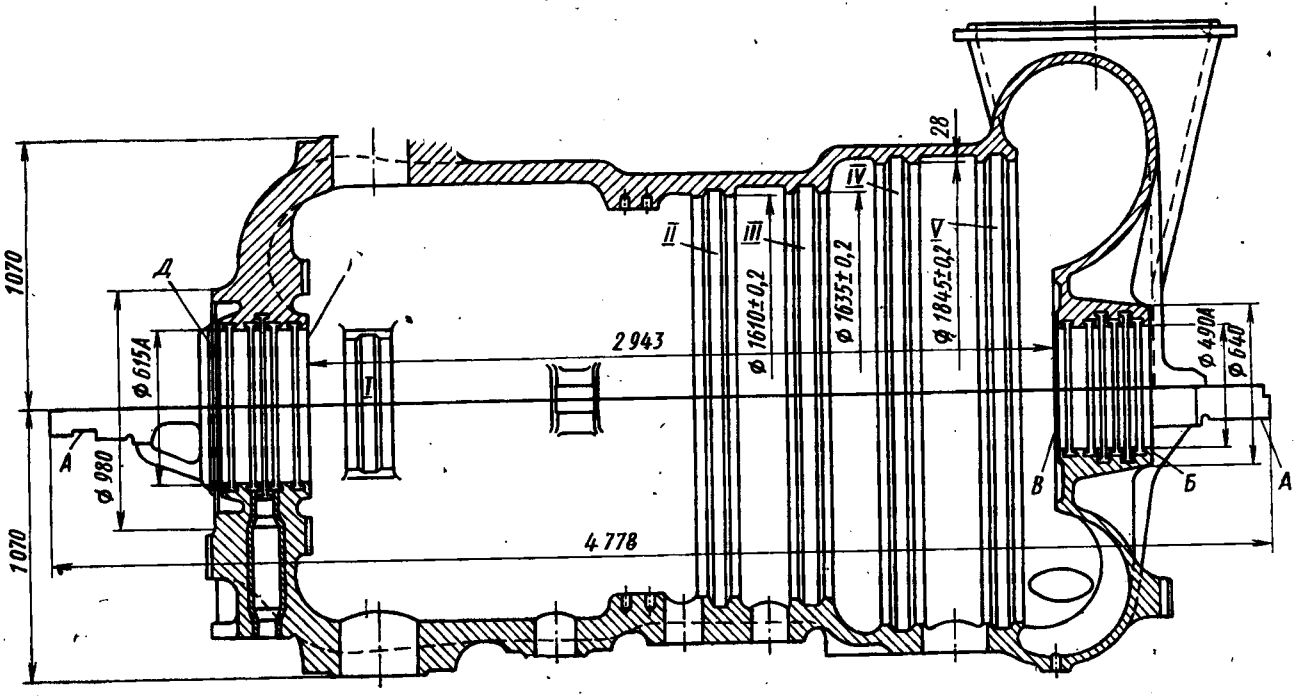


Рис. 137. Цилиндр высокого давления турбины ВКТ-100 мощностью 100 МВт

То же относится и к обоймам. Сборка деталей *12* и *13* и растачивание в них отверстий *а* и *б* также производятся отдельно от корпуса турбины. Для этого после растачивания отверстия диаметром 300 мм деталь *13* с корпуса турбины снимается. Отсюда следует, что для сравнения технологических схем обработки рассмотренных здесь конструкций корпусов надо принимать во внимание не весь корпус, а каждую из его частей (деталь в сборке *1* и *4*; *10* и *16* или *11*, *13* и *14*), представляющих собой самостоятельные типовые технологические узлы.

Наличие вертикальных разъемов, вызванное стремлением улучшить качество литья, облегчает и упрощает механическую

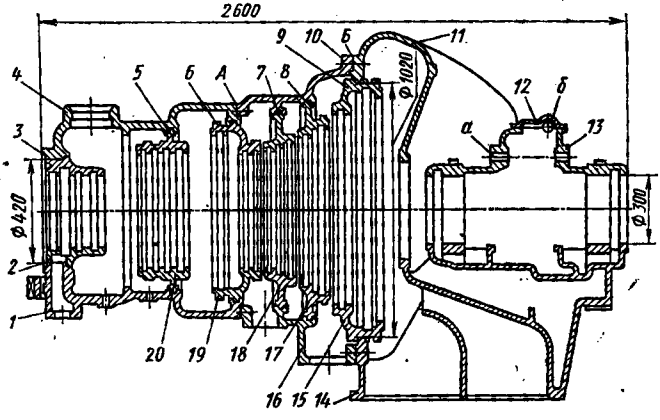


Рис. 138. Корпус турбины АП-25-2 мощностью 25 МВт

обработку. Корпусы, аналогичные показанному на рис. 137, растачивают в основном на расточных станках (в собранном виде или по половинам), а показанные на рис. 138 — на карусельных. Растачивание на карусельных станках в большинстве случаев является более удобным и производительным. Вместе с этим все части корпуса, разделенные по разъемам *А* и *Б*, могут обрабатываться одновременно на нескольких станках, что значительно сокращает общий цикл обработки корпуса, а следовательно, и всей турбины. В этом одно из больших преимуществ вертикальных разъемов.

В отличие от рассмотренных выше двух типов корпусов, корпус и его элементы, показанные на рис. 139, имеют вертикальный разъем, не являющийся общим для верхней и нижней половин. При такой конструкции верхние и нижние половины частей корпуса перед чистовой обработкой горизонтальных разъемов и чистовой расточкой соединяются по вертикальным разъемам, после чего в собранном виде обрабатываются по горизонтальным разъемам.

Для обработки различных конструкций корпусов паровы: турбин можно рекомендовать единый типовой технологически маршрут (т. е. перечень основных этапов процесса их обработ ки). Работы, перечисленные в перечне как предварительной, та: и окончательной обработки, названы здесь этапами, так как мно гие из них состоят из нескольких самостоятельных операций

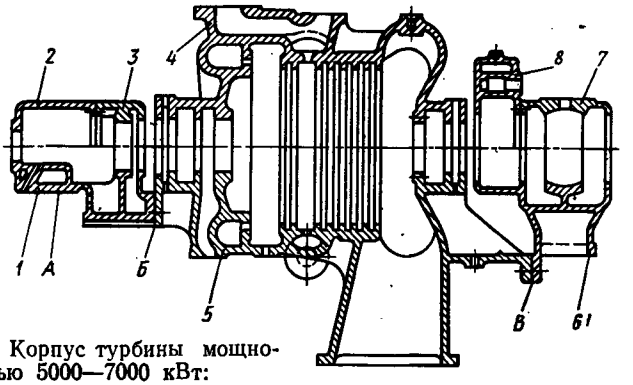


Рис. 139. Корпус турбины мощностью 5000—7000 кВт:

1 — 8 — детали корпуса; *А* — опорная базовая плоскость; *Е, В* — вертикальные разъем

Например, «обработка плоскостей горизонтальных разъемов ба зовых площадок и фланцев у верхней и нижней половин по раз метке» состоит из многих операций.

Этапы предварительной обработки корпусов

1. Проверка размеров отливок верхней и нижней половин ци линдров и разметка их под обработку плоскостей горизонталь ных разъемов, базовых площадок и фланцев.

2. Обработка плоскостей горизонтальных разъемов, опорны плоскостей, базовых площадок и фланцев у верхней и нижне половин по разметке.

3. Разметка под сверление технологических отверстий на го ризонтальных разъемах для сборки верхней и нижней полови под совместное растачивание.

4. Сверление и нарезание технологических отверстий на разъ емах верхней и нижней половин.

Этапы 3 и 4 при обработке отливок из углеродистых стале часто заменяют прихваткой одной половины корпуса к друго посредством электрической сварки.

5. Сборка верхней и нижней половин под растачивание.

6. Растачивание.

7. Разборка после растачивания.

8. Очистка черных, не подлежащих обработке, поверхносте отливок для контроля качества литья (очистка производитс дробеструйными аппаратами, ручными шлифовальными машин ками и другими способами).

9. Контроль ОТК.

10. Разделка обнаруженных литейных дефектов под исправление заваркой.

11. Исправление дефектов литья заваркой и наплавка металла в местах с недостаточным припуском на чистовую обработку.

12. Термическая обработка для снятия внутренних напряжений после заварки и наплавки.

Этапы окончательной обработки корпусов

1. Очистка после термической обработки (обычно дробеструйная).

2. Обработка базовых поверхностей и плоскостей горизонтальных разъемов.

3. Разметка под обработку отверстий на фланцах горизонтальных разъемов.

4. Сверление и нарезание отверстий на разъемах.

5. Сборка верхней и нижней половин под растачивание.

6. Разметка под растачивание.

7. Растачивание.

8. Разметка под обработку всех мелких площадок и фланцев.

9. Фрезерование или строгание площадок и фланцев.

10. Разметка под сверление отверстий на площадках и фланцах.

11. Сверление и нарезание отверстий.

Этапы 8, 9, 10 и 11 могут выполняться раздельно на верхней и нижней половинах корпусов, для чего после растачивания они должны быть разобраны.

12. Гидравлические испытания.

Особенности изготовления сварно-литых корпусов турбин высокого давления. Для изготовления сварно-литых корпусов (рис. 140) конструкторским бюро завода выпускается сборочный чертеж и комплект детальных чертежей. По детальным чертежам производится отливка и механическая обработка деталей под сварку; по сборочному чертежу — сборка, сварка и окончательная механическая обработка корпуса. Размеры в детальных чертежах указываются с учетом припусков на окончательную механическую обработку, выполняемую уже после сварки.

Предварительная механическая обработка верхней и нижней половин цилиндра под сварку ведется в соответствии с рассмотренным выше технологическим маршрутом.

Перед сваркой с корпусом паровые и сопловые коробки подвергают гидравлическому испытанию. Это позволяет своевременно выявить и устранить литейные дефекты, так как осмотр и исправление сопловых коробок после сварки их с цилиндром весьма затруднительно или даже вообще невозможно выполнить.

До сборки под сварку отливки корпуса тщательно осматривают. Все дефектные места (трещины, раковины и др.) отмечают мелом, вырубают или высверливают до полного удаления по-

роков и травят. Если травление показывает удовлетворительное состояние поверхности разделки дефектного места, то его заваривают.

После исправления отливок заваркой обязательна термическая обработка для снятия внутренних напряжений. Во избежание повторения дорогого и довольно длительного процесса термической обработки его обычно выполняют уже после сварки корпуса с сопловыми и паровыми коробками. Если дефекты обнаруживаются при окончательной механической обработке, а их заварка и последующая термическая обработка могут вызвать

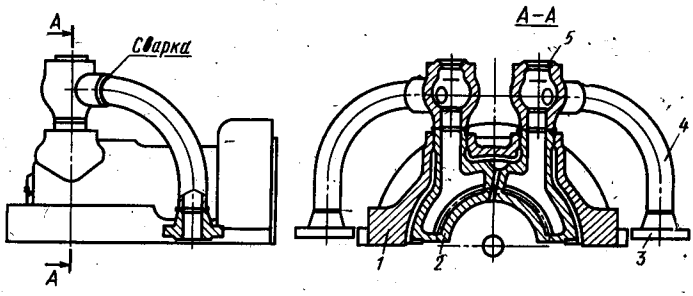


Рис. 140. Верхняя половина сварно-литого корпуса с приваренными сопловыми и паровыми коробками:

1 — верхняя половина корпуса; *2* — сопловые коробки; *3* — фланцы; *4* — трубы; *5* — паровые коробки

изменение размеров корпусов, вопрос о целесообразности заварки и вторичной термической обработки решается в каждом отдельном случае главным металлургом завода.

Для правильной сборки деталей под сварку изготовляются и применяются специальные сборочные приспособления, представляющие собой устройства для взаимного фиксирования и закрепления свариваемых деталей в том положении, которое они должны занимать в готовой детали. Приспособления должны быть наиболее простыми. Для примера на рис. 141 показано приспособление для сборки под сварку внутреннего цилиндра турбины Р-100/130 с сопловыми коробками, выполненное в виде отдельных блоков. Благодаря такому простому устройству устанавливается правильное положение сопловых коробок относительно корпуса.

Корпусы турбин с высокими параметрами пара изготовляются из жаропрочных хромомолибденовых сталей. Сварку таких сталей производят с нагревом при строгом соблюдении теплового режима, так как эти стали при сварке в холодном состоянии могут давать трещины. Район сварки нагревают до температуры не ниже 250—300°, которая должна сохраняться в течение всего процесса сварки. Для предохранения от остывания деталь укутывают асбестовым полотном; места сварки оставляют открытыми.

В случае снижения температуры ниже 250° производят вторичный подогрев. После сварки корпус полностью укутывают асбестовым полотном для медленного охлаждения в течение 12 ч.

Очистку сварных швов от брызг и шлака и контроль проводят после охлаждения. Контроль обычно производят наружным осмотром, однако по требованию ОТК может выполняться местное сверление, вырубка зубилом и просвечивание рентгеном. Вырубленные места заполировываются и травятся. Их заварка

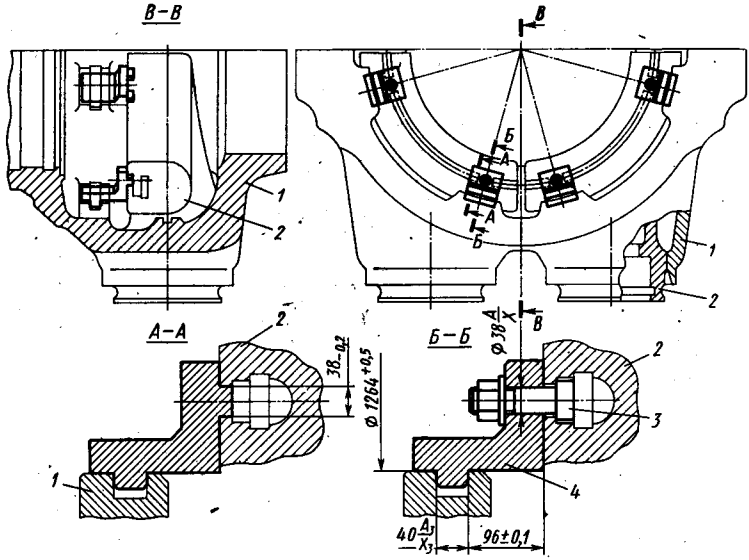


Рис. 141. Приспособление для сборки под сварку внутреннего цилиндра турбины Р-100/130 с сопловыми коробками:

1 — внутренний цилиндр; *2* — сопловая коробка; *3* — болт; *4* — блок фиксирующий

производится электродами определенных марок, обеспечивающих состав материала шва, аналогичный основному металлу отливок.

Для сварки и заварки дефектов деталей из сталей перлитного класса ЦНИИТМАШем разработан ряд специальных марок электродов. Например, для сварки и заварки дефектов деталей из стали 20ХМФЛ разработаны электроды марки ЦЛ-20; для деталей из стали 15Х1М1Ф — электроды марки ЦЛ-27; для сталей 15ХМФКР, 15Х2М2ФБС — электроды марки ЦЛ-26М.

Окончательная механическая обработка после сварки и термической обработки сварно-литых корпусов ведется в соответствии с приведенными выше технологическими маршрутами.

Особенности изготовления двухстенных корпусов. Оба корпуса двухстенной конструкции, внутренний и наружный (рис. 142), обрабатываются предварительно и окончательно в соответствии с типовыми маршрутами, рассмотренными выше. Исключение

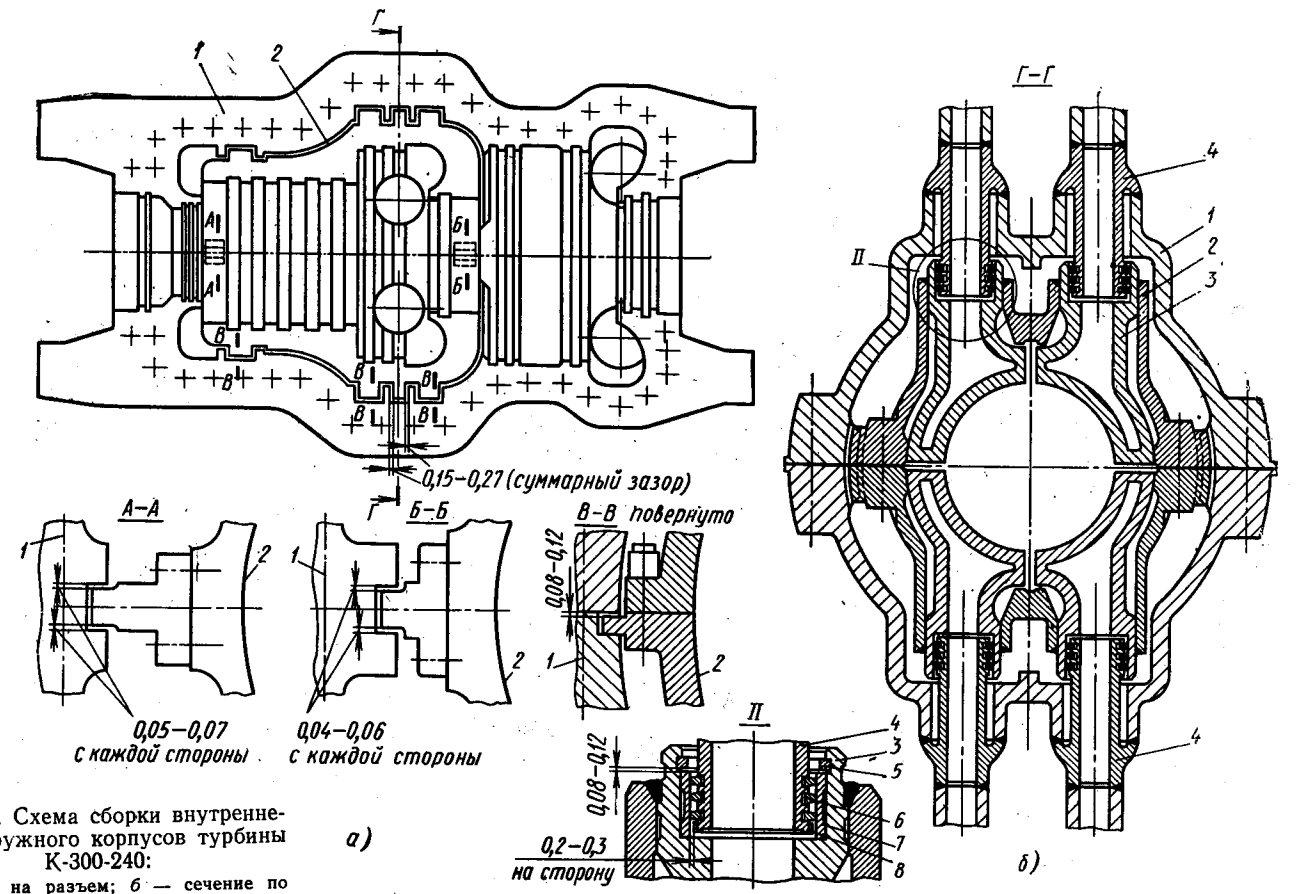


Рис. 142. Схема сборки внутреннего и наружного корпусов турбины К-300-240:

а — вид на разъем; *б* — сечение по паропроводящим патрубкам; *1* — наружный цилиндр; *2* — внутренний цилиндр; *3* — сопловая коробка (приваривается к внутреннему цилиндру); *4* — патрубок паровпуска; *5* — сегмент стопорный; *6* — кольцо поршневое; *7* — втулка; *8* — кольцо центровочное; *А — А* — узел центрирующей задней шпонки; *Б — Б* — узел центрирующей передней шпонки; *В — В* — разрез по опорным лапам

составляют патрубки подвода пара к внутреннему корпусу через наружный, которые обрабатываются после окончательной сборки внутреннего и наружного корпусов под растачивание.

После окончательной сборки корпусов, как показано на рис. 142, *б*, но до приварки патрубков *4*, через наружный корпус производят обработку отверстий в сопловых коробках внутреннего корпуса. Такая обработка может быть ограничена только первым проходом резца (т. е. снятием первой стружки), чтобы получить базу, обеспечивающую возможность окончательной раздельной обработки отверстий после разборки корпусов в более удобных условиях. При большой серийности для такой обработки целесообразно применять специальные кондукторы.

5. Выбор баз для обработки и измерений

При механической обработке корпусов одной из наиболее ответственных задач является правильное базирование корпуса на станке или в приспособлении. Во многих случаях точность обра-

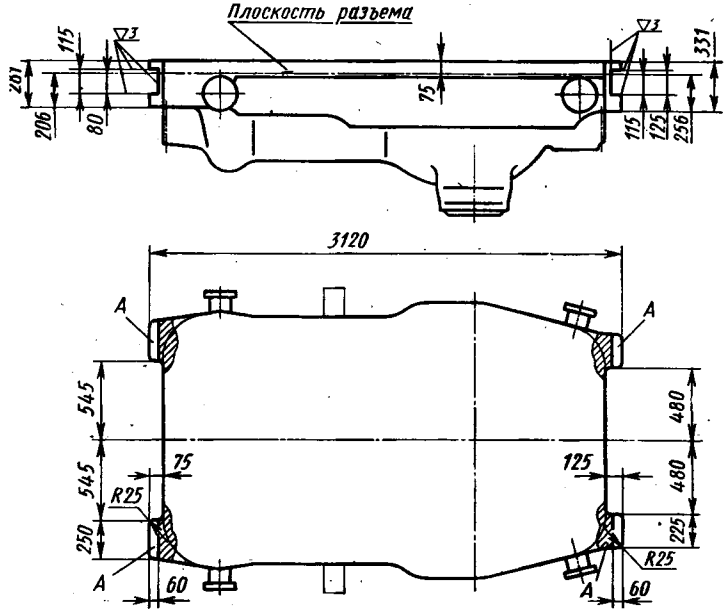


Рис. 143. Специальные технологические приливы верхней половины ЦВД турбины ВТ-100-1 и обработка базовых площадок в технологических приливах. *А* — приливы

ботки и величина вспомогательного времени зависят от того, каким образом осуществляется базирование и закрепление детали на станке или в приспособлении.

Технологические базы нужно выбирать еще в процессе конструирования корпуса. Для простоты установки и надежного крепления детали в процессе обработки в конструкции корпусов должны предусматриваться специальные приливы и площадки (рис. 143). Особенное внимание следует уделять выбору установочных баз для нежестких деталей, деформирующихся под действием даже относительно небольших усилий.

Большинство корпусов, редукторов, конденсаторов, фундаментных рам и других деталей турбин по своему внешнему виду производят впечатление очень жестких деталей. Однако они легко прогибаются под действием собственного веса, сил резания и зажимов. Эти прогибы часто достигают недопустимых величин и, будучи неучтенными, приводят к большим отклонениям от соосности расточенных поверхностей корпуса. Для создания условий, обеспечивающих минимальные деформации корпуса, при разработке технологических процессов необходимо предусматривать специальные приспособления, тщательно продумывать способы установки и выверки корпусов под расточку, разрабатывать необходимые конструкции, определяющие наиболее правильное ведение операций установки и обработки конкретных конструкций корпусов. Устанавливать под обработку и растачивать нежесткие корпусы, целесообразно на тех же опорах, какие используются и в работающей турбине, выравнивая реакции симметричных опор с помощью динамометра.

6. Предварительная обработка корпусов

Отливки частей корпуса вначале подвергаются обдирке, в которой и заключается сущность предварительной механической обработки. Чтобы вскрыть имеющиеся в отливке раковины и другие дефекты, при обдирке необходимо снимать как можно больший слой металла, оставляя минимальный практически допустимый припуск на окончательную обработку.

При выборе припусков на чистовую обработку нужно учитывать деформации, возникающие при термической обработке отливок после обдирки. Опытом установлено, что для отливок малых размеров величины припусков могут быть равны 1—2 мм, для средних 1—3 мм и для крупных 2—5 мм на сторону.

На разных мелких площадках, бонках и прочих свободных неответственных поверхностях припусков на чистовую обработку можно не оставлять или, если указанные поверхности невелики, при предварительной обработке их можно не обрабатывать.

Обдирке предшествует ряд подготовительных операций: проверка отливок и разметка; обмер толщин стенок (для судовых турбин), что может выполняться с помощью ультразвуковых приборов; комплектация половин корпусов, которая заключается в подборе литых заготовок верхних и нижних половин цилиндров, наиболее подходящих друг к другу по размерам.

Очистка отливок. Отливки поставляются в механический цех без прибылей и литников, очищенными от формовочной земли, проконтролированными на отсутствие поверхностных литейных дефектов и термически обработанными. Все литейные дефекты должны быть исправлены поставщиком заваркой. Однако большая ответственность за качество поставляемых турбин заставляет турбинные заводы производить у себя дополнительную очистку отливок и повторный контроль качества. Как показывает практика, очистка, проведенная в литейных цехах, может считаться лишь предварительной.

Поэтому одной из первых операций предварительной обработки чугунных и стальных отливок в механическом цехе является весьма тщательная окончательная очистка их от окалины как снаружи, так и внутри, особенно поверхностей, омываемых в работающей турбине паром или маслом. Очистка производится в дробеструйной камере с помощью дробеструйных аппаратов мелкими фракциями чугунного или стального песка. Установлено, что лучшим материалом для дробеструйной очистки является не круглая дробь, а колотые стальные или чугунные куски мелкой фракции (размером 0,2—0,5 мм).

После дробеструйной очистки на поверхности отливки более ясно обозначаются мелкие литейные дефекты. Для более надежного выявления дефектов необходимо до дробеструйной очистки все поверхности отливки обильно смазать керосином. Керосин легко проникает в мелкие трещины и поры. Благодаря этому после обработки дробью на чистой поверхности отливки значительно облегчается выявление дефектов по керосиновым пятнам, образующимся возле дефектных мест. Целесообразно для такой же цели применять флуоресцирующие составы, легко проникающие в поры отливок.

В местах, не доступных для шлангов дробеструйного аппарата, например в паровых и масляных каналах, очистка должна выполняться с особой тщательностью. Здесь применяются пневматические машинки, снабженные гибким валом с абразивным кругом, или пневматические зубила разных форм и длин. Обследование плохо доступных мест производится с помощью металлического зеркала, закрепленного на длинной рукоятке.

Повышение надежности корпусов турбин. С применением в турбиностроении высоких параметров пара и газа возникла необходимость широкого использования жаропрочных сталей и сплавов, способных длительно работать при высоких температурах. В связи с этим в производстве корпусов турбин возникли новые задачи, вызванные появлением в жаропрочном литье дефектов, которых не было в отливках из углеродистых сталей.

Наиболее опасными из выявленных дефектов жаропрочных отливок корпусов явились рыхлость и внутренние раковины, расположенные на различной глубине отливки и не обнаруживаемые при механической обработке. Оставаясь не обнаруженными, эти

дефекты существенно снижают надежность корпуса в процессе эксплуатации турбины. Характерными дефектами таких отливок являются также мелкие трещины, находящиеся на любой глубине залегания и на поверхностях отливок у радиусных переходов. Кроме того, в отливках из жаропрочных сталей наблюдается разброс твердости в различных местах заготовок. Наличие существенных дефектов в жаропрочных отливках поставило турбинные заводы перед необходимостью, с целью повышения надежности турбин, резко повысить требования к контролю их качества.

В технологию предварительной механической обработки корпусов внесено много дополнительных контрольных и механических операций, связанных с различными способами обнаружения и удаления дефектов литья. Основными способами повышенного контроля являются:

а) визуальный осмотр после дробеструйной обработки поверхности отливок;

б) травление радиусных переходов, мест подвода питателей, плоскостей разъема и мест приварки сопловых и паровых коробок; радиусные переходы, подлежащие травлению, указываются на эскизе отливки, составленном заказчиком и согласованном с поставщиком; перед травлением места контроля шлифуются до 7-го класса чистоты;

в) ультразвуковая дефектоскопия (УЗД) плоскостей разъема и стенки цилиндра (на спинке) на полосе шириной 0,5 м; чистота обработки плоскостей разъема под УЗД должна устанавливаться практически сообразно применяемым приборам;

г) керосиновая проба по всем поверхностям за исключением камер отбора пара; керосиновая проба и травление производятся до выполнения сварки корпуса и последующей термической обработки, а также вторично после отпуска для снятия сварочных напряжений;

д) рентгенографирование корпусов цилиндров, которое выполняется в необходимых случаях по требованию ОТК.

Нормы на приемку по каждому из видов испытаний устанавливаются техническими условиями и эталонами. Объем и методы повышенного контроля качества отливок могут уточняться по мере накопления опыта в производстве и эксплуатации.

Устранение дефектов стальных отливок производится как описано выше, т. е. заваркой с последующими термической обработкой и контролем.

Разметка под механическую обработку. Разметка имеет большое значение для обеспечения высокого качества обработки корпусов и выполнения ими своего служебного назначения. При разметке решаются следующие основные задачи:

а) устанавливаются связи, определяющие размеры и повороты поверхностей, образующихся в процессе механической обра-

ботки, относительно поверхностей, остающихся необработанными;

б) проверяются размеры литого или сварого корпуса, определяется наличие достаточных припусков на механическую обработку.

При решении первой задачи необходимо иметь в виду двойную роль цилиндра, отводимую ему в работающей турбине. Наряду с тем, что цилиндр играет роль базирующей детали турбины, он также представляет собой полость определенной формы для подвода, распределения и отвода рабочей среды. Внутренние поверхности корпуса являются, таким образом, исполнительными поверхностями. Для уменьшения потерь рабочей среды указанные поверхности профилируются по данным исследований аэродинамики потоков на моделях и должны иметь не только требуемую форму, но и правильное расположение относительно оси цилиндра. Ввиду сложности формы они оставляются необработанными, в то время как поверхности основных и вспомогательных баз обрабатываются.

Правильное расположение внутренних рабочих поверхностей относительно базовых определяется разметкой под обработку плоскостей горизонтальных разъемов. На заготовке размечают оси и линии, определяющие положение необрабатываемых поверхностей, от которых и производят разметку всех поверхностей, подлежащих обработке.

Вторая задача состоит в определении величины фактически имеющихся припусков. Оптимальная величина припуска на механическую обработку в зависимости от размеров детали должна находиться в пределах 4—10 мм на сторону. В тех отдельных местах, где припуск оказывается недостаточным или вовсе отсутствует, наносят мелом или краской пометки с указанием толщины слоя и размеров поверхности для наплавки металла, с целью образования необходимого припуска.

Операция разметки корпусов должна выполняться квалифицированными разметчиками. Выполняется она обычными методами с установкой корпуса в два положения: горизонтальное и вертикальное.

Типовые режимы резания для предварительной обработки корпусов приведены в табл. 20 и 21.

Весьма прогрессивным методом предварительной обработки корпусов цилиндров при серийном производстве турбин является растачивание их по половинам на специальном цилиндрорасточном станке модели НР-6 (рис. 144).

На этом станке предварительно растачивают корпус с припуском 5 мм на сторону.

Перед предварительной обработкой на плоскости разъема обеих половин корпуса размечаются контуры всех расточек по специальному шаблону. Половина корпуса устанавливается и крепится на специальном приспособлении к установочной плите

Таблица 20

Типовые режимы резания для предварительного строгания и торцового фрезерования поверхностей стальных и чугунных корпусов

Вид обработки	Материал отливки	Материал инструмента	Скорость резания в м/мин	Подача в мм*	Глубина резания в мм
Строгание	Чугун	Р9	10	3,5—4,5	25—30
	»	ВК8	До 30	1,5—2,5	10—20
	Сталь	Р9	7—10	3—4	25—30
Торцовое фрезерование	Чугун	Р9	30	0,15	5—6
	»	ВК8	80	0,10	5—6
	Сталь	Р9	18	0,12	5—6
	»	Т5К10	80—100	0,1—0,2	5—6

* При строгании на двойной ход, при фрезеровании на один зуб.

Таблица 21

Типовые режимы резания для предварительного растачивания корпусов на расточных и карусельных станках (работа по корке)

Наименование станка	Материал отливки	Материал инструмента	Скорость резания в м/мин	Подача в мм/об	Глубина резания в мм
Расточной	Чугун	Р9	18	1,8—2,5	5—8
	»	ВК8	60	0,8—1,2	5
	Сталь	Р9	20	1,8—1,5	5—8
	»	Т5К10	80	0,8—1,0	5
Карусельный	Чугун	Р9	9—10	3—4	30
	»	ВК8	35	1,2—1,4	20
	Сталь	Р9	8—12	2,5—3,5	30
	»	Т5К10	60	0,8—1,0	18

станка, которая должна быть расположена так, чтобы ось вращения шпинделя станка максимально точно совпала с плоскостью разъема цилиндра.

Обработка производится многорезцовыми блоками, закрепленными на шпинделе станка. Комплект блоков показан на рис. 145. Блоки выполнены из двух половин с разъемом в диаметральной плоскости, что обеспечивает простоту и легкость смены и установки их на шпинделе станка. Некоторые из них, как видно из рисунка, имеют радиальные направляющие, по которым могут перемещаться каретки с резцедержателями. Такое устройство необходимо, например, для установки резцов на стружку и для расточки Т-образных гнезд под сегменты сопел на внутренней торцовой поверхности цилиндра.

Резцы в блоке устанавливаются по шаблонам в определенной последовательности, в нужном положении по диаметру и с со-

блюдением необходимых размеров между режущими кромками резцов в осевом направлении. Таким образом, многорезцовым блоком можно снимать весь припуск (до 70 мм на сторону) за

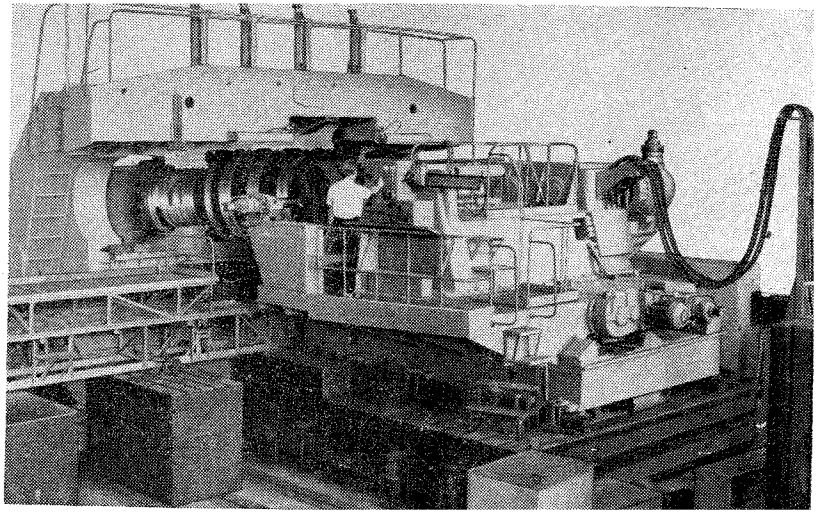


Рис. 144. Общий вид станка НР-6 с установленной на нем верхней половиной цилиндра

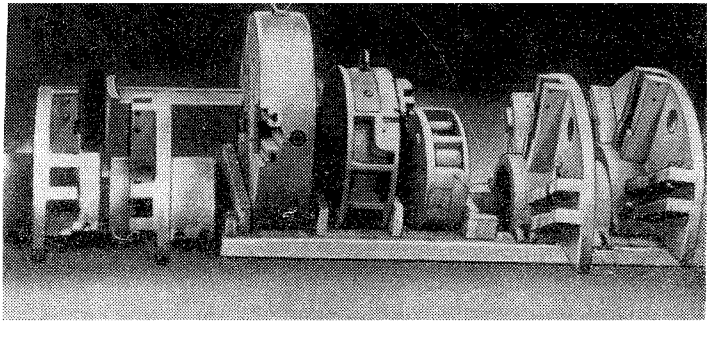


Рис. 145. Комплект расточных блоков к станку НР-6

один проход. Подрезка торцов и прорезка канавок также производится на этом станке за один проход. С помощью резцовых блоков можно обрабатывать корпусы разных диаметров.

Использование специализированного станка дает ряд преимуществ перед карусельными и расточными станками: применение многорезцовых блоков и более высоких режимов резания

повышает производительность труда, снижая трудоемкость обработки; обработка корпусов в горизонтальном положении улучшает их качество и обеспечивает более безопасные условия труда рабочего. Практика эксплуатации станка НР-6 показывает, что при некоторой модернизации он может быть использован и для чистовой окончательной обработки цилиндров.

7. Окончательная механическая обработка корпусов

Окончательная, т. е. чистовая, механическая обработка корпусов производится обычно по разрабатываемым заранее технологическим схемам, в которых указываются порядок обработки, применяемые оборудование и режущие и измерительные инструменты. Ниже приводится описание наиболее ответственных из сложных операций окончательной обработки корпусов.

Чистовая обработка плоскостей разъема выполняется на продольно-строгальных, продольно-фрезерных или карусельных станках. Наиболее целесообразным видом чистовой обработки является фрезерование на продольно-фрезерных станках двумя вертикальными шпинделями с применением фрезерных головок большого диаметра — до 800 мм и более. Такие головки обычно полностью охватывают всю обрабатываемую поверхность и фрезеруют ее за один проход; при этом не образуется уступов, которые неизбежны при обработке поверхности за несколько проходов. Для чистовой обработки плоскостей разъема применяют фрезы с широкой режущей кромкой, которые позволяют вести тонкое фрезерование, обеспечивая высокую чистоту обработки, соответствующую 6—7-му классам. Такая чистота может привести к возможности отказа от последующей операции шабрения плоскостей разъема. При отсутствии фрезерных станков используют горизонтально-расточные станки. Режимы резания для торцовых фрез и расточных головок приведены в табл. 22.

Таблица 22

Рекомендуемые режимы резания для чистового фрезерования

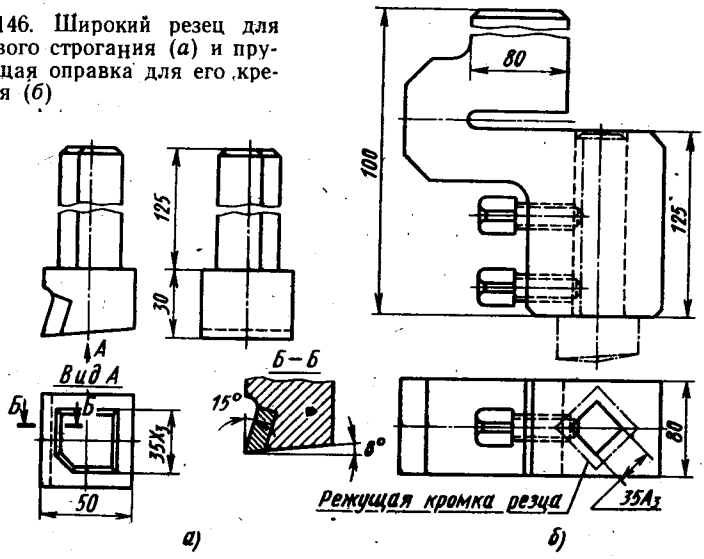
Материал детали	Материал инструмента	Скорость резания в м/мин	Подача в мм/зуб	Глубина резания в мм
Чугун	Р18	45	0,12	1—2
	ВК6	120—180	0,08	1
Сталь	Р18	30—50	0,08	1—2
	Т15К6	250	0 06	1

Продольно-фрезерные станки более производительны, чем строгальные, однако на ряде заводов для обработки корпусов больших габаритов используются и продольно-строгальные стан-

ки, что связано с производственными возможностями этих заводов.

Чистовое строгание широкими резцами, в сравнении с обычными чистовыми, дает улучшенную чистоту поверхности, повышает производительность обработки, сокращает объем последующих ручных доводочных работ (опиловку, шабрение), а в ряде случаев дает возможность и вовсе отказаться от них. На рис. 146 показаны широкий резец и пружинящая державка для его крепления. При обработке стали режущая кромка широкого резца

Рис. 146. Широкий резец для чистового строгания (*а*) и пружинящая оправка для его крепления (*б*)



должна быть повернута по направлению строгания на угол 45—60°, что достигается поворотом гнезда для резца в державке на указанный угол. При этом упрощается конструкция резца, облегчается его изготовление, заточка и доводка. При строгании широким резцом обрабатываемая поверхность должна смазываться смесью из 50% легкого машинного масла и 50% керосина. Режимы резания при строгании указаны в табл. 23.

При установке и креплении корпуса для обработки плоскости горизонтального разъема необходимо соблюдать следующие ус-

Таблица 23

Режимы резания при строгании широкими резцами из стали Р18

Материал детали	Скорость резания в мм/мин	Подача в мм/дв. ход	Глубина резания в мм
Чугун	10—41	16—24	0,3
Сталь	15—20	6—10	0,2—0,3

ловия. При креплении не должно нарушаться заданное установкой положение детали. Силы зажима должны обеспечивать неизменность положения детали в течение всей обработки; при этом деталь не должна деформироваться от собственного веса, сил зажима и сил резания.

Нарезание резьбы во фланцах производится метчиками. Конструкции метчиков больших диаметров — 80—160 мм (рис. 147) принципиально отличаются от конструкции метчиков меньшего размера. Крупные метчики изготовляются со вставными ножами, цельными или с приваренными пластинами из стали Р18. Главное отличие специальных крупных метчиков от стандартных мет-

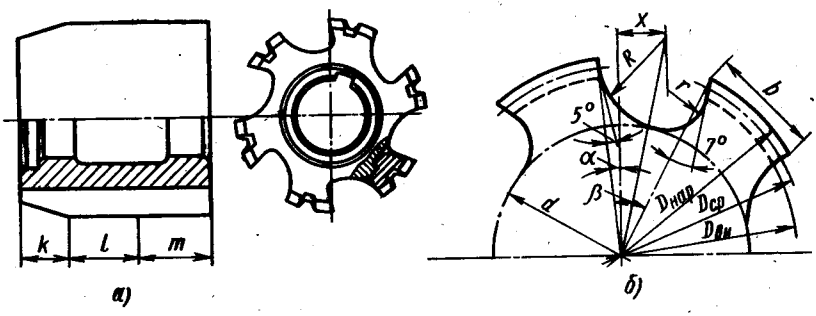


Рис. 147. Метчик для нарезания резьбы большого диаметра:
а — общий вид; *б* — профиль канавки; *k* — заборная часть; *l* — цилиндрическая часть (две нитки); *m* — обратный конус

чиков средних и малых диаметров состоит в изменении конструкции основных элементов рабочей части метчика и его среднего диаметра. Комплект метчиков для больших диаметров резьб обычно состоит из трех, а при необходимости, и из четырех последовательно применяемых метчиков, нагрузка между которыми распределяется приблизительно в следующем соотношении: для первого метчика 35%, второго 30%, третьего 25% и четвертого 10%. Хорошо показали себя в работе метчики с шахматным расположением ниток на режущих кромках; в этом случае нитки на режущих кромках срезаются через одну в шахматном порядке, что облегчает работу метчиков, обеспечивая чистую поверхность резьбы.

Для примера в табл. 24 даны диаметры комплекта из трех метчиков для нарезания резьбы М170 × 4. Размеры профиля канавок метчиков берутся в зависимости от наружного диаметра резьбы D: $d = 0{,}625\,D$; $b = 0{,}2\,D$; $R = 0{,}2\,D$; $r = 0{,}087\,D$; $x = 1{,}0\,D$; $\alpha = 12°\,11'$; $\beta = 37°$.

Приведенные здесь характеристики соответствуют профилю канавок метчика для нарезания резьбы в углеродистой стали и в чугуне.

Таблица 24

Диаметры метчиков (в мм) для нарезания резьбы М170×4

Номер метчика	$D_{нар}$		$D_{ср}$		$D_{вн}$
	наибольший	наименьший	наибольший	наименьший	наибольший
1	168,00	167,80	167,03	166,90	164,71
2	169,70	169,56	167,30	167,17	165,00
3	170,38	170,28	167,49	167,43	165,02

При нарезании глухих отверстий применяются фрикционные патроны (рис. 148). На рисунке показан фрикционный патрон простой конструкции для метчиков диаметром от 16 до 60 мм.

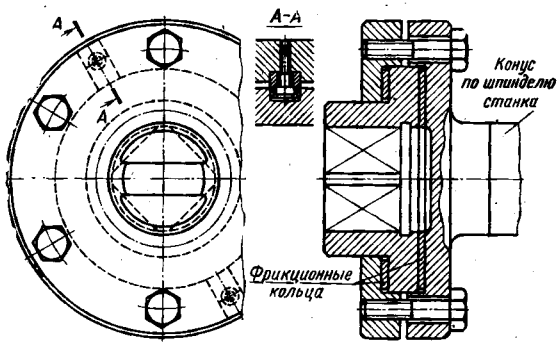


Рис. 148. Предохранительный фрикционный патрон

Настройка фрикционного устройства на определенный крутящий момент производится соответствующей затяжкой болтов.

Для метчиков диаметром 100—160 мм изготовляются более мощные патроны (рис. 149). Основными частями этого патрона являются поводковая оправка *1*, корпус *3*, диски фрикционные *5* и промежуточные *6*. Фрикционные диски армированы пластинами ферродо. Регулирование крутящего момента производится с помощью тарельчатых пружин *4* и гайки *2*. Для облегчения веса патрона корпус и промежуточные диски выполнены из дюралюминия. Оправка *8* и ведущая шайба *7* — сменные. В работе этот патрон показан на рис. 150.

Накатывание резьбы в корпусах. При нарезании резьб большого диаметра (до 160 мм) в отливках корпусов из легированных сталей трудно получить качественную резьбу 2-го класса точности. На ЛМЗ разработан метод нарезания крупных резьб с последующей накаткой. Работы ведутся на радиально-сверлильном станке. Отверстие под резьбу сверлят несколько большего

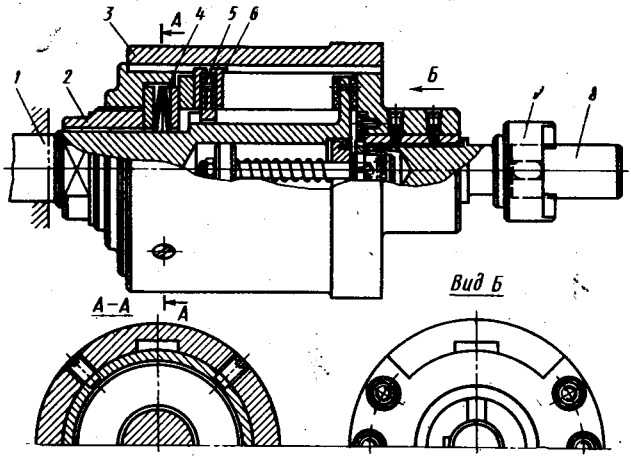


Рис. 149. Фрикционный патрон для нарезки резьбы М120

диаметра (на 0,2—0,3 мм), чем обычно; оптимальный диаметр предварительного отверстия для такой обработки устанавливается опытным путем. После сверления нарезается резьба специальным метчиком с несколько уменьшенным средним диаметром, который также следует для данного случая определять опытным путем. В подготовленное таким образом отверстие ввинчивается головка для накатывания резьбы. Головка (рис. 151) имеет три ролика и получает принудительное вращение; при этом сами накатные ролики вращаются под действием сил трения. В процессе раскатки резьба доводится до чертежных размеров. Накатные ролики имеют кольцевые канавки; ось каждого ролика наклонена на угол подъема резьбы. Ролики смещены относительно друг друга в осевом направлении на $^1/_3$ шага и могут перемещаться в осевом направлении на 0,1—0,15 мм. Скорость накатывания 15—20 м/мин. Твердость поверхностного слоя резьбы, вследствие образующегося при накатке наклепа повышается на 50%.

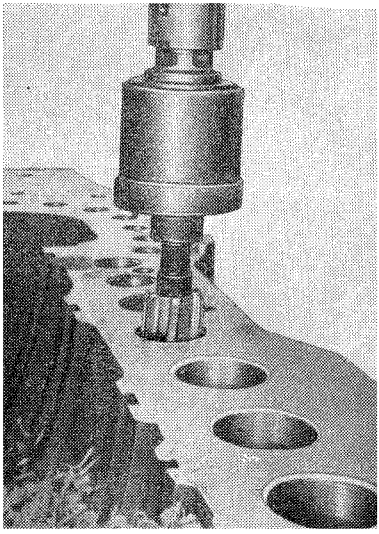


Рис. 150. Фрикционный патрон в работе

Промежуточная сборка для растачивания. Сборка корпуса для растачивания включает в себя следующие операции: шабрение плоскостей фланцев вертикальных и горизонтальных разъемов корпуса; ввертывание шпилек; развертывание на фланцах отверстий для установочных болтов или штифтов; пригонку и постановку установочных болтов или штифтов; соединение частей корпуса; маркировку крепежа.

Слесарной обработкой (шабрением) добиваются плотного прилегания плоскостей разъема, обеспечивая его паронепроницаемость без применения уплотняющих прокладок. Проверка плотности прилегания плоскостей производится по слабо окрашен-

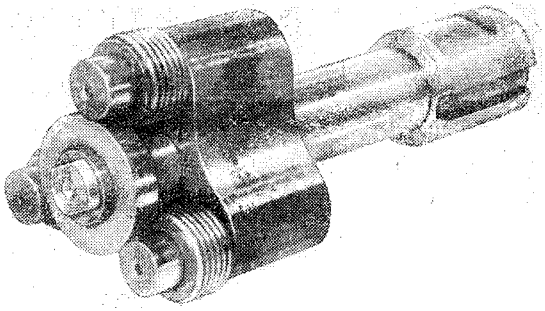


Рис. 151. Головка для накатывания резьбы диаметром 140 мм

ной контрольной плите. Точность определяется по количеству пятен краски, равномерно расположенных на площадке размером 25 × 25 мм. Кроме того, проверка производится щупом 0,05 мм, который не должен проходить между проверяемой плоскостью и контрольной плитой. Лишь в отдельных местах допускается проход щупа в разъем, но на глубину не более 10 мм.

В табл. 25 указаны классы точности обработки шабрением плоских поверхностей применительно к разъемам корпусов турбин, редукторов и конденсаторов. Классы точности шабрения указываются в рабочих чертежах турбины.

Процесс шабрения осуществляется в следующем порядке. Сначала пришабривают плоскости горизонтального разъема нижней части корпуса с проверкой качества шабрения по контрольной плите или линейке. При шабрении верхней части качество шабрения контролируют по уже обработанной нижней части, которой пользуются в этом случае как контрольной плитой.

При шабрении плоскостей вертикальных разъемов применяют аналогичный порядок, т. е. сначала пришабривают одну часть по контрольной плите, потом обработанной первой частью пользуются для проверки качества шабрения второй части данного

Таблица 25

Точность шабрения различных плоскостей турбин

Класс точности шабрения	Количество пятен на площади 25×25 мм	Обрабатываемые поверхности
Ш-1	Св. 18	Особо точные плоскости
Ш-2	12—17	Разъемы корпусов турбин высоких параметров пара; разъемы крышек подшипников с корпусами турбин
Ш-3	7—11	Разъемы корпусов турбин средних параметров пара
Ш-4	3—6	Разъемы корпусов турбин низких параметров; опорные лапы на корпусах турбин и редукторов. Разъемы в корпусах конденсаторов и других водоподготовительных устройствах, соединяющихся без прокладок. Разъемы кожухов и коробок соединительных муфт с корпусами турбин
Ш-5	2—4	Разъемы корпусов редукторов турбин. Разъемы конденсаторов и водоподготовительных устройств, соединяющихся на прокладках

разъема. Для облегчения контрольной плиты, ее следует изготовлять по форме, приближенной к форме контура данного разъема.

После шабрения ввертывают шпильки во все нарезанные отверстия на фланцах. По техническим условиям слабина в сопряжении резьб не допускается. Шпильки должны ввертываться с небольшим натягом. Такое сопряжение обеспечивается допусками для тугой резьбы. Чтобы избежать заедания шпилек, поверхность резьбы предварительно смазывают ртутной пастой или натирают графитом.

После установки шпилек верхние и нижние части корпуса скрепляют между собой по горизонтальному разъему. До окончательной затяжки болтов детали следует отцентровать по контрольным рискам. Чтобы сохранить точное взаимное расположение деталей при повторных сборках, применяют установочные болты. Отверстия для них выполняют после сборки двух половин. Точность их размеров должна выдерживаться в пределах второго класса, а шероховатость поверхности не ниже 8-го класса чистоты. При повторных сборках не должна изменяться плотность посадки установочных болтов и не должно образовываться задиров на их поверхности. Конусность и овальность болта или отверстия допускается не более половины допуска на отверстие. Для предохранения болта от заедания создают диаметральный зазор в пределах 0,01—0,02 мм.

8. Чистовое растачивание корпусов на расточных станках

Для растачивания корпусов применяют расточные станки с диаметром шпинделя 150—250 мм или расточные головки. В зависимости от имеющегося оборудования, вида производства и размеров растачиваемых корпусов они могут обрабатываться на стационарных плитах, поворотных столах или в специальных приспособлениях. В серийном производстве становится целесообразным изготовление для этой цели специальных расточных стендов.

При растачивании корпусов на расточных станках применяют механизированные расточные борштанги (рис. 152), летучие или дисковые суппорты, подшипниковые стойки (люнеты) для установки борштанги, добавочные люнеты для устранения прогиба борштанги от собственного веса и сил резания, стойки для установки корпусов на плите, комплект регулируемых опор и комплект зажимных приспособлений.

Соединение борштанги со шпинделем расточного станка целесообразно делать без шарниров (рис. 152). Шарнирные соединения (типа Гука и др.) борштанги со шпинделем станка на практике себя не оправдали, так как такие соединения в ряде случаев становятся источником возникновения вибрации борштанги. С целью предупреждения этого, при использовании шарнирных соединений приходится снижать скорости резания и уменьшать сечение снимаемой стружки. Кроме этого, при использовании шарнирных соединений борштанги со станком может появиться некоторое осевое смещение борштанги относительно растачиваемого корпуса, в силу чего при подрезке торцовых поверхностей могут изменяться аксиальные размеры корпуса.

К конструкциях расточных борштанг предусматриваются особые устройства для радиальной подачи инструмента. Эти устройства должны быть легко управляемыми при любых режимах резания и обеспечивать плавность и равномерность подачи.

Устройство для радиальной подачи отдельных резцедержателей (стаканов) показано на рис. 152. От червяка, который поворачивается с помощью расположенной на торце борштанги рукоятки, вращение передается червячному колесу, связанному со скалкой борштанги винтовой нарезкой (разрез *АА*). При повороте червячного колеса скалка перемещается. Для того чтобы скалка не вращалась вокруг своей оси, она снабжена продольным пазом, а в отверстии под скалку установлена шпонка. Подобное же устройство для подачи режущего инструмента имеется и на дисковых суппортах (рис. 153).

При разработке технологического процесса расточки корпуса вычерчивают схему установки, в которой указывают:

а) общий план установки с расположением растачиваемого корпуса на станке, расположением подшипниковых стоек для борштанги, стоек под корпус и основных опор;

б) места расположения дополнительных регулируемых опор под корпус и дополнительной опоры для борштанги;

в) места расположения зажимов для корпуса, подшипниковых стоек и стоек под деталь;

г) способы установки борштанги и центровки шпинделя станка с ней;

д) методы проверки установки корпуса относительно борштанги.

Перед установкой корпуса необходимо нанести мелом разметку установки всех опорных стоек относительно станка. На рис. 154 приведен план расположения оснастки для растачивания корпуса турбины типа ВКТ-100.

Выверка борштанги производится с помощью индикатора (рис. 155, *а*). При этом требуется, чтобы длина пути *l* была максимально возможной, но не меньшей 500 мм. При проверке положения борштанги относительно вертикальной плоскости необходимо учитывать прогиб борштанги под действием собственного веса. Он определяется с помощью прецизионных уровней «Геологоразведка» или уровней с сообщающимися сосудами (рис. 155, *б*), установленными на борштангу. При помощи сообщающихся сосудов определяют как горизонтальность положения борштанги, так и отсутствие в ней прогибов. Для установки сосудов на проверяемую борштангу в контролируемых точках помещают специальные призмы, закрепляемые хомутом (разрез *АА*). Горизонталь-

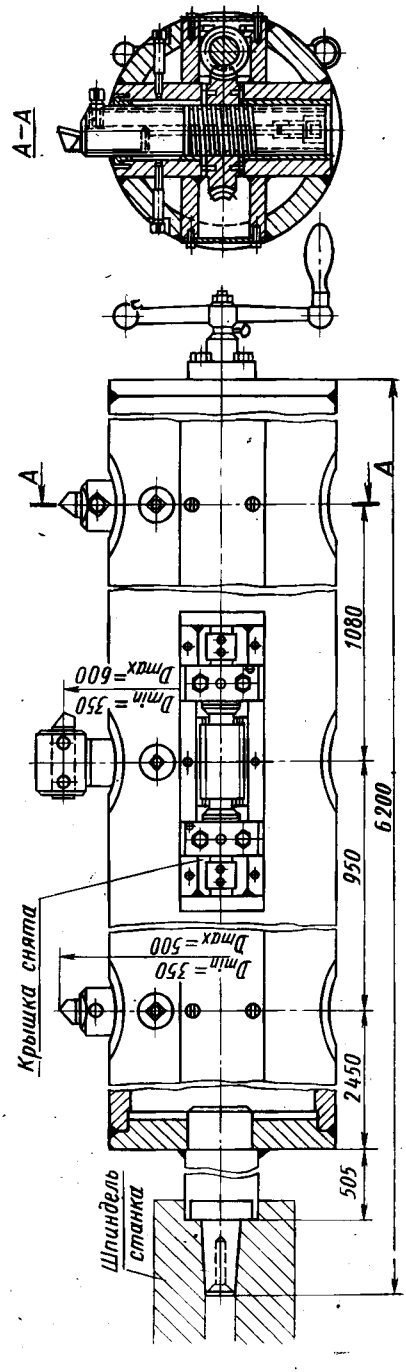


Рис. 152. Борштанга для растачивания корпусов

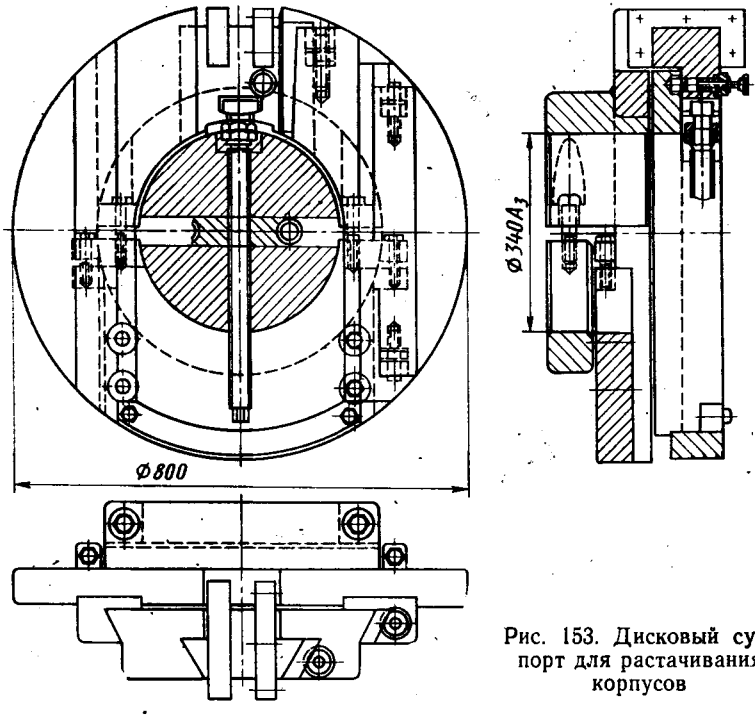


Рис. 153. Дисковый суппорт для растачивания корпусов

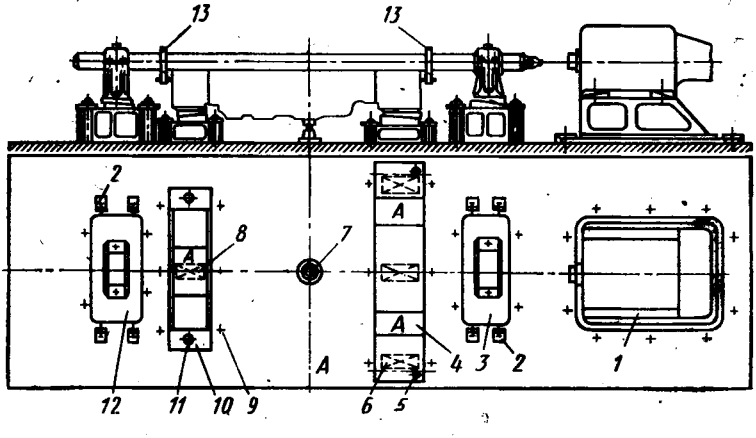


Рис. 154. План расположения оснастки для обработки корпуса турбины типа ВКТ-100 на расточном стенде:

1 — расточная головка; *2* — винтовые упоры; *3* — передняя стойка борштанги; *4* — передняя подставка для растачиваемого цилиндра; *5* — винтовые домкраты; *6, 8* — клиновые домкраты; *7* — винтовой домкрат; *9* — места прикрепления оборудования к плите станка; *10* — задняя подставка для растачиваемого цилиндра; *11* — винтовые домкраты; *12* — задняя стойка борштанги; *13* — хомуты с чертилками

ность положения призмы в поперечном направлении проверяется с помощью обычного уровня.

Перемещение борштанги в горизонтальной и вертикальной плоскостях относительно шпинделя станка производится за счет перемещения подшипниковых стоек или регулировки положения вкладышей. Подшипниковые стойки *3* и *12* (см. рис. 154) в горизонтальном направлении перемещаются при помощи винтовых упоров *2*, а в вертикальном направлении — клиновыми домкра-

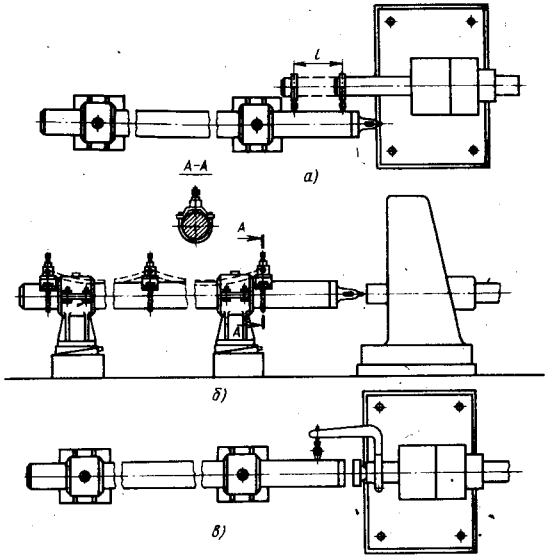


Рис. 155. Схема установки и выверки расточной борштанги:

а — проверка положения борштанги относительно вертикальной и горизонтальной плоскостей, проходящих через ось шпинделя станка; *б* — проверка горизонтальности; *в* — прицентровка шпинделя станка с осью борштанги.

тами, устанавливаемыми под основания стоек. У ряда стоек для этой же цели основания подшипников выполняют наклонными.

Проверив борштангу и закрепив окончательно подшипниковые стойки на плите, производят контрольную проверку борштанги. Затем выверяют расположение нижней части обрабатываемого корпуса турбины относительно борштанги. При установке корпуса на три основные опоры *А* одной опорой служит клиновой домкрат *8*, в контакте с которым находится нижний горизонтальный фланец корпуса. Две другие опоры *А* расположены на передней подставке *4* под углом, соответствующим уклонам двух боковых фланцев корпуса. Подставка *4* с двумя опорами для корпуса установлена на двух основных клиновых домкратах *6* и одном вспомогательном винтовом домкрате *5*. Домкраты дают возможность перемещать корпус при установке. Корпус равномерно за-

крепляют на станке, чтобы предупредить появление упругих деформаций, и обязательно добиваются полного совпадения оси расточки корпуса с осью борштанги и плоскости горизонтального разъема корпуса с осью борштанги (или с осью расточки).

Выверку положения корпуса относительно борштанги начинают с обеспечения совмещения плоскости горизонтального разъема корпуса с осью борштанги. Корпус при этом должен лежать свободно только на трех опорах *А*.

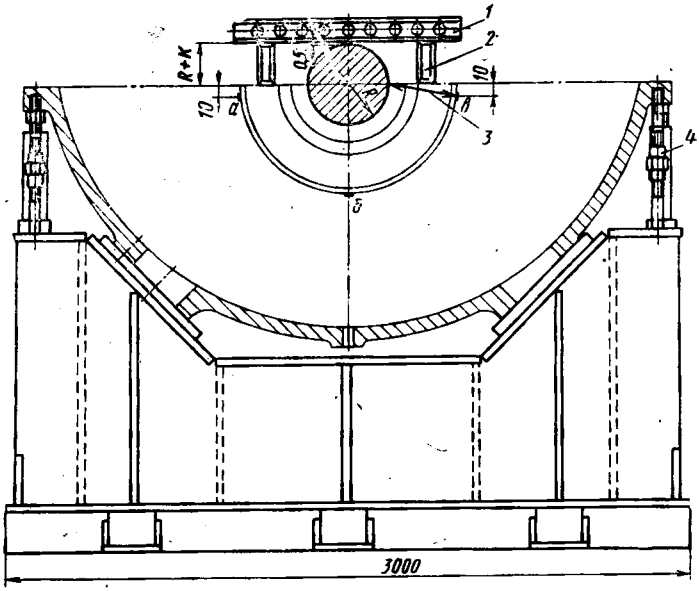


Рис. 156. Установка нижней половины корпуса на передней подставке

Установка корпуса на передней подставке отдельно показана на рис. 156. На плоскость горизонтального разъема корпуса, в местах расточек под переднее и заднее уплотнения, устанавливают две одинаковые призмы *2*, высота которых равна $R + K$, где R — радиус борштанги, $K = 0{,}5$ мм. Накладывая на эти призмы линейки *1*, замеряют зазор. У расточек под переднее и заднее уплотнения зазор должен быть одинаковым. Для получения зазора, равного K, в случае перемещения корпуса вверх или вниз пользуются клиновыми домкратами *6* и *8* (см. рис. 154).

Совмещение оси корпуса с осью борштанги в горизонтальной плоскости контролируется по круговым рискам, нанесенным разметкой на наружных торцах корпуса. Выверку производят двумя чертилками, закрепленными в хомутах *13* на борштанге.

После выверки установки нижней половины цилиндра относительно борштанги можно приступать к центровке борштанги со шпинделем станка. Совмещение оси борштанги с осью станка проверяется с помощью индикаторного приспособления (см. рис. 155, *в*). С учетом наличия жесткого соединения борштанги со шпинделем, о чем было сказано выше, допустимые смещения (несоосность) должны быть не более 0,015—0,020 мм; допустимый перекос на длине 1000 мм — не более 0,05 мм. При проверке соосности индикаторным приспособлением необходимо, чтобы длина пути передвижения индикатора в осевом направлении также была максимально возможной (не менее 500 мм).

На качество растачивания корпуса существенно влияет прогиб борштанги под действием собственного веса, при наличии которого расточки отдельных мест корпуса окажутся эксцентричными. Прогиб тем больше, чем больше расстояние между стойками. Кроме собственного веса борштанги, на величину ее прогиба значительное влияние оказывают силы резания. Влияние этих сил особенно велико вследствие больших величин диаметров растачиваемых мест в корпусе, которые доходят до 1900 мм. Поэтому, когда это оказывается необходимым по условиям работы борштанги, кроме двух основных опор, для предупреждения ее прогиба устанавливается добавочный промежуточный люнет. Конструкция промежуточных люнетов определяется формой растачиваемого корпуса и его жесткостью.

Для устранения прогиба борштанги применяется следующий метод. В месте установки люнета определяют стрелу прогиба борштанги, зачищают три контрольные площадки *а*, *б* и *в* и замеряют микрометрическим штихмасом *3* расстояния от площадок до борштанги (см. рис. 156). Затем в установку вводят промежуточный люнет и регулировкой последнего выбирают прогиб борштанги. Производимый при этом замер от площадки *б* служит для контроля изменения положения борштанги по высоте при выборе прогиба. Установочные размеры до площадок *а* и *в* должны оставаться неизменными. Окончательную центровку борштанги со шпинделем станка производят после установки дополнительных люнетов и устранения прогиба борштанги.

Проверив установку корпуса, приступают к установке вспомогательных опор и закреплению корпуса на общей плите. Количество и места приложения вспомогательных опор и зажимов определяют в зависимости от конструктивных форм и габаритов корпуса и указывают в схеме установки (например: опоры *5*, *7* и *11* на рис. 154 и *4* — на рис. 156).

Дополнительными опорами под корпус могут служить винтовые и клиновые домкраты или трубчатые винтовые стойки. Трубчатые стойки изготовляются со сменными трубками разных высот. Для проверки отсутствия деформации корпуса при уста-

новке вспомогательных опор следует пользоваться индикаторами, располагая их на плите станка.

Для правильного процесса растачивания корпуса необходимо также разрабатывать специальные технологические схемы. В этих схемах указывают места расточек и их размеры и дают перечни необходимых режущих и измерительных инструментов с указанием мест их применения и методов измерения. Наличие технологических схем повышает производительность труда, так как сокращает время на подбор требуемого инструмента.

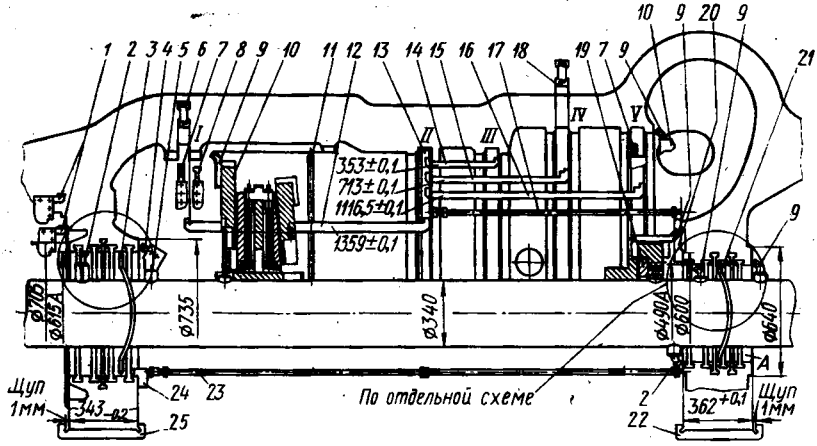


Рис. 157. Технологическая схема растачивания корпуса турбины ВКТ-100 для единичного производства:

1 — подрезной левый резец; *2* — проходной правый резец; *3* и *21* — скобообразные штихмасы; *4*, *9* — проходные левые резцы; *5* — резцедержатель; *6* и *18* — пробки; *7* — прорезной резец; *8* — фасонный резец; *10* и *19* — расточные диски; *11*, *17* и *23* — микрометрические штихмасы; *12*, *14* — *16* — шаблоны на длину; *13* — специальная линейка; *20* — шаблон на высоту; *22* и *25* — скобы; *24* — универсальный угольник

В качестве примера, на рис. 157 приведена технологическая схема растачивания корпуса турбины ВКТ-100. Растачивание корпуса по этой схеме начинается с обработки мест под уплотнения (концевых отверстий). Вследствие сложности данной конструкции корпуса, в собранном состоянии можно расточить лишь концевые отверстия и их торцы. Остальные поверхности растачивают отдельно в верхней и нижней половинах корпуса. Для совместного растачивания верхней и нижней половин корпуса применяют борштангу с механизированными выдвижными резцедержателями и расточными суппортами. При обработке поверхности *А* диаметром 640 мм и отверстия диаметром 490А за измерительную базу принимают предварительно нанесенную разметочную риску. По окончании этой операции верхнюю часть корпуса снимают и производят

настройку резца для подрезки внутреннего торца диаметром 600 мм, принимая за измерительную базу наружный уже обработанный торец *А*.

После повторной установки верхней части корпуса на место этот торец обтачивают одновременно в обеих частях на размер $362^{+0,1}$. Затем верхнюю часть корпуса снова снимают и резец настраивают для точения внутреннего торца диаметром 735 мм, принимая за измерительную базу торец диаметром 600 мм. После новой установки верхней части на свое место точат и этот торец. Затем от торца диаметром 735 мм обрабатывают торец диаметром 705 мм на размер $343_{-0,2}$ и растачивают отверстие диаметром 615А.

Для обработки наружного торца и торцовой выточки на борштангу устанавливают расточной суппорт, посредством которого подрезают торец и уступ. После этого суппорт устанавливают внутри корпуса для точения пазов *I*, *II*, *III*, *IV* и *V*. Вначале в нижней части корпуса обрабатывают правый торец паза *I*, после чего резец отводят внутрь корпуса. Затем соединяют верхнюю часть корпуса с нижней и производят обработку того же торца паза *I* в верхней части при ранее настроенном резце. Удалив снова верхнюю часть корпуса, точат окончательно все поверхности паза *I* в нижней части. Соответствующие поверхности паза *I* в верхней части обрабатывают отдельно.

Правый торец паза *II* в нижней части обрабатывают, отведя резец в сторону. Не сбивая его в осевом направлении, накладывают верхнюю часть на нижнюю, обрабатывают тот же торец паза *II* в верхней части. После этого снова снимают верхнюю часть корпуса и производят растачивание остальных поверхностей паза *II* в нижней части, а соответствующие поверхности паза *II* в верхней части точат при установке отдельно. Пазы *III*, *IV* и *V* обрабатывают также, как и пазы *I* и *II*. При отдельной обработке пазов в верхней части (без установки ее на нижнюю) за измерительные базы принимаются правые торцы, обработанные при соединении обеих частей корпуса.

При наличии второго комплекта оборудования растачивание верхней части корпуса производят параллельно с обработкой нижней части. В противном случае обработку ведут последовательно на одном и том же станке. Для установки и крепления верхней части требуются другие стойки и установочные приспособления, так как по конфигурации наружных установочных баз верхняя и нижняя части корпуса являются различными.

Нижняя часть корпуса остается на месте и с этой же установки производится растачивание Т-образных канавок лабиринтных уплотнений. Обработка канавок производится при помощи механизированных резцедержателей, встроенных в борштангу. Расточной суппорт снимается.

Точение Т-образных канавок, находящихся в двух концевых отверстиях корпуса, ведется последовательно. При этом приме-

няют специальные резцы и шаблоны, указанные в технологической схеме. Измерительными базами при точении боковых сторон Т-образных канавок служат обработанные наружные торцы концевых отверстий. Чтобы облегчить замер диаметра канавки, на плоскость разъема у канавки устанавливают и закрепляют брусок прямоугольного сечения. При обработке паз протачивается и в бруске, вследствие чего длина дуги канавки несколько увеличивается, что позволяет произвести измерение диаметра в этом месте обычным способом.

Типовые режимы резания, применяемые при чистовом растачивании корпусов, приведены в табл. 26.

Таблица 26

Типовые режимы при чистовом растачивании корпусов на расточных станках

Материал детали	Материал инструмента	Режимы резания (глубина резания 1 мм)	
		Подача в мм/об	Скорость резания в м/мин
Чугун	Р18	0,3	30
	ВК6	0,2—0,3	150
Сталь	Р18	0,2—0,3	40
	Т15К6	0,2—0,3	140

9. Специальные способы растачивания корпусов цилиндров

Описанный выше способ растачивания корпусов применяется в единичном производстве и имеет тот недостаток, что в зависимости от количества обрабатываемых мест, при его применении, требуется многократно снимать и ставить на место верхние части корпуса. Это связано с большой затратой времени на сборку и разборку верхней части корпуса, с простоями в ожидании необходимых для этого подъемных средств, а также с износом и возможными повреждениями крепежных деталей корпуса. Растачивание таких корпусов в серийном производстве можно производить при помощи кондукторов.

При растачивании корпуса с помощью кондуктора сначала обычным путем обрабатывают концевые отверстия в собранном корпусе. Затем снимают верхнюю часть и растачивание остальных поверхностей ведут у каждой половины корпуса отдельно на расточных или карусельных станках. На плоскость горизонтального разъема каждой половины накладывают специально изготовленный кондуктор, ориентируясь на который и производят растачивание. Эту обработку целесообразно выполнять на специальных стендах с применением расточных головок, механизированных борштанг и дисковых суппортов.

На рис. 158 показан кондуктор для растачивания корпуса турбины ВР-25. По кондуктору выполняется растачивание посадочных поверхностей для внутреннего корпуса и обоймы, а также обработка внутренних концевых торцов. С целью упрощения изготовления кондуктора он выполнен сварным. Кондукторные планки *2—5* крепят к корпусу *1* винтами *7* и фиксируют штифтами *6*. Установку и центровку кондуктора на плоскости разъема производят по ранее обработанным (в собранном корпусе) концевым полуотверстиям и одному базовому наружному торцу. Прилегание посадочных поверхностей кондуктора

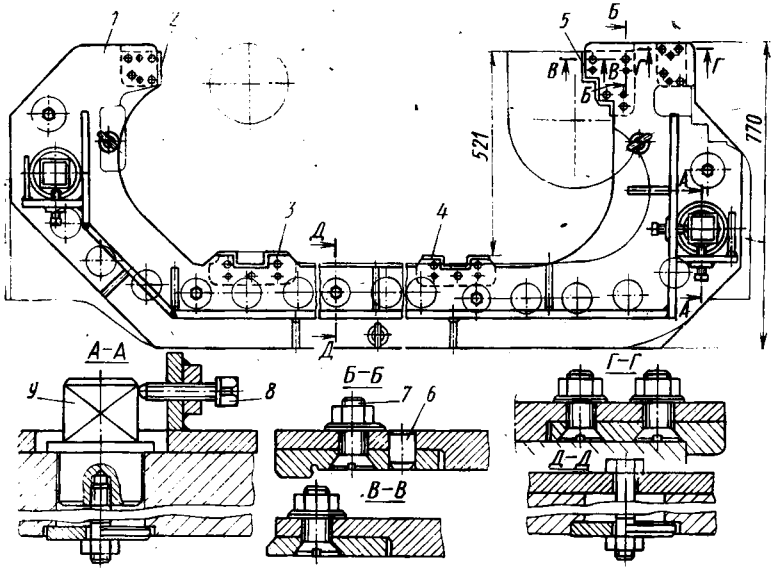


Рис. 158. Кондуктор для растачивания корпусов турбин

к корпусу турбины обеспечивается тремя натяжными болтами *8*, упирающимися в два упора *9*. Эти упоры установлены на корпусе независимо от кондуктора.

Размеры растачиваемого корпуса выдерживают ориентируясь на кондукторные планки *2—5*, выставляя относительно них резцы с зазором 0,5 мм по щупу. После растачивания нижней части корпуса кондуктор устанавливают на плоскость разъема верхней части корпуса и производят ее обработку. При растачивании необходимо следить за резцом, не допуская соприкосновения его с рабочими кромками кондуктора. Наличие двух таких кондукторов (правого и левого) позволит вести обработку верхней и нижней частей одновременно на двух расточных станках.

Растачивание корпусов по кондуктору также имеет некоторые недостатки. Так как верхняя и нижняя половины корпуса обрабатываются раздельно, то при некоторых неточностях в установке кондукторов и обработки могут появиться несовпадения расточек; при раздельной обработке половин корпуса турбины резец работает с ударами; кроме этого, требуется дополнительная сложная установка верхней части корпуса на расточном стенде.

Чтобы избежать указанных затруднений, целесообразно верхнюю часть корпуса обрабатывать на карусельном станке.

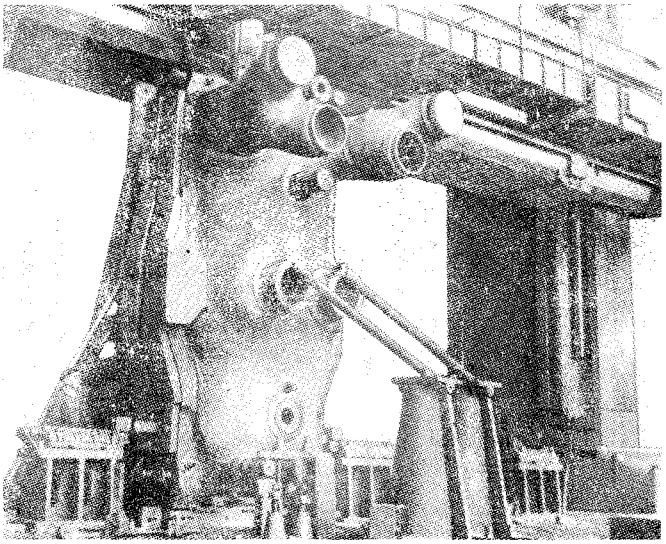


Рис. 159. Корпус цилиндра в сборе под обработку на карусельном станке

Применение расточного кондуктора в этом случае упрощает процесс растачивания и сокращает цикл обработки, по сравнению с описанным выше способом, за счет устранения значительной потери времени на многократно-повторную установку верхней половины корпуса.

В целях дальнейшего повышения производительности обработки некоторые заводы, например ЛМЗ, предпочитают полностью растачивать закрытые корпусы цилиндров, не имеющих вертикальных разъемов, в собранном виде, но не на расточных, а на карусельных станках, соблюдая при этом все требования по технике безопасности (рис. 159), что при таком методе обработки имеет особое значение.

10. Растачивание корпусов на токарно-карусельных станках

Растачивание корпусов в собранном виде имеет большие преимущества перед раздельной обработкой их половин как с точки зрения качества обработки, так и с точки зрения существенного повышения производительности труда. При раздельной обработке очень трудно избежать образования уступов в расточках верхней и нижней половин цилиндра под обоймы и диафрагмы и таким образом обеспечить внутреннюю плотность собранной проточной части. Однако растачивание закрытых цилиндров в собранном виде можно рекомендовать лишь при наличии достаточно крупных патрубков входа и выхода пара, обеспечивающих свободный доступ внутрь цилиндра в процессе обработки, для осмотра обработанных поверхностей и производства замеров.

Конструкция корпусов турбин, подобных показанному на рис. 137, позволяет производить растачивание как на расточном, так и на карусельном станках. Целесообразность применения того или иного вида обработки в конкретном случае определяется исходя из габаритов детали, особенности ее конструкции и жесткости, наличия оборудования и его загрузки, точности имеющихся станков и с учетом экономичности различных процессов. Последняя определится из трудоемкости обработки и затрат на специальную оснастку. При этом следует учесть, что оснастка для карусельных станков в большинстве случаев оказывается более экономичной, чем для расточных.

Однако важнейшим критерием при выборе наиболее рационального вида обработки должно быть качество изготовления детали. Следует иметь в виду, что экономия в производстве, получаемая за счет некоторых уступок в качестве детали, обычно выражается в рублях, а потери в эксплуатации турбин за счет снижения их качества — в тысячах и сотнях тысяч рублей. Кроме того, совершенно невозможно подсчитать те огромные потери, которые образуются в различных отраслях народного хозяйства при нарушении работы турбин, обеспечивающих их энергией.

При установке корпуса турбины для растачивания на карусельном станке необходимо, чтобы:

а) плоскость горизонтального разъема корпуса совпадала с осью вращения планшайбы или, что то же самое, с осью будущей расточки по всей высоте детали, т. е. необходимо, чтобы не было перекоса;

б) центр окружности (круговой риски), нанесенной при разметке на торце детали, совпадал с осью вращения планшайбы (выверка в плоскости, перпендикулярной к плоскости разъема);

в) боковые поверхности шпоночных пазов *А* (см. рис. 137) в лапах цилиндров и в опорах на фундаментные рамы были строго горизонтальны и перпендикулярны оси расточки, в соответствии с техническими требованиями;

г) крепление детали обеспечивало неизменность ее положения во время обработки и достаточную жесткость, не допускающую образования вибраций.

На рис. 160, *а* показана схема установки верхней половины корпуса *1*, а на рис. 160, *б* — собранного корпуса для растачивания на карусельном станке. Основной частью установки является угольник *10* с цапфой *11*, размер которой *Д* соответствует диаметру установочного отверстия *14*, расположенного в центре планшайбы станка. Установочная плоскость угольника *В* (рис. 160, *д*) перпендикулярна поверхности планшайбы и совмещена с ее осью. Угольник *10* крепится к планшайбе. Собранный цилиндр лапами *13* нижней половины *2* располагают на клиновые домкраты *12*, подобно тому, как показано на виде *А* для установки верхней половины, и плотно прижимается к угольнику *10* планками *17*.

Плотное прилегание нижних лап к угольнику обеспечивает совпадение оси расточки с плоскостью разъема в нижней части установленной детали. Совмещение оси цилиндра с осью планшайбы в плоскости, перпендикулярной к плоскости разъема осуществляется путем перемещения цилиндра вдоль угольника *10* с помощью кулачков *5* до совпадения осевой линии, размеченной на цилиндре, с осевой линией цапфы *11*, размеченной на угольнике *10*.

Перпендикулярность оси обрабатываемого корпуса относительно плоскости планшайбы обеспечивается угольником с цапфой *6*. Этот угольник крепится к лапам нижней половины корпуса *2* или к технологическим приливам, обработанным заодно с плоскостью горизонтального разъема. В поперечном направлении ось цапфы совмещается с осью цилиндра по разметке.

Выверка положения верхней части цилиндра производится по индикатору, укрепленному в резцедержателе, методом обычной проверки на биение. Наклон цилиндра изменяют соответственно показаниям индикатора с помощью клиновых домкратов *12* (в плоскости горизонтального разъема корпуса) и трубчатых домкратов *3* и упоров *4* (в плоскости, перпендикулярной к плоскости разъема корпуса). Биение цилиндра в верхней части, определяемое по индикатору, не должно быть более 0,03 мм. После выверки и окончательного закрепления обрабатываемого цилиндра его положение снова тщательно контролируется с помощью индикатора, чтобы не допустить нарушения точности установки.

Для центровки разъема по оси расточки, вместо угольников *10* с цапфой, соответствующей установочному отверстию

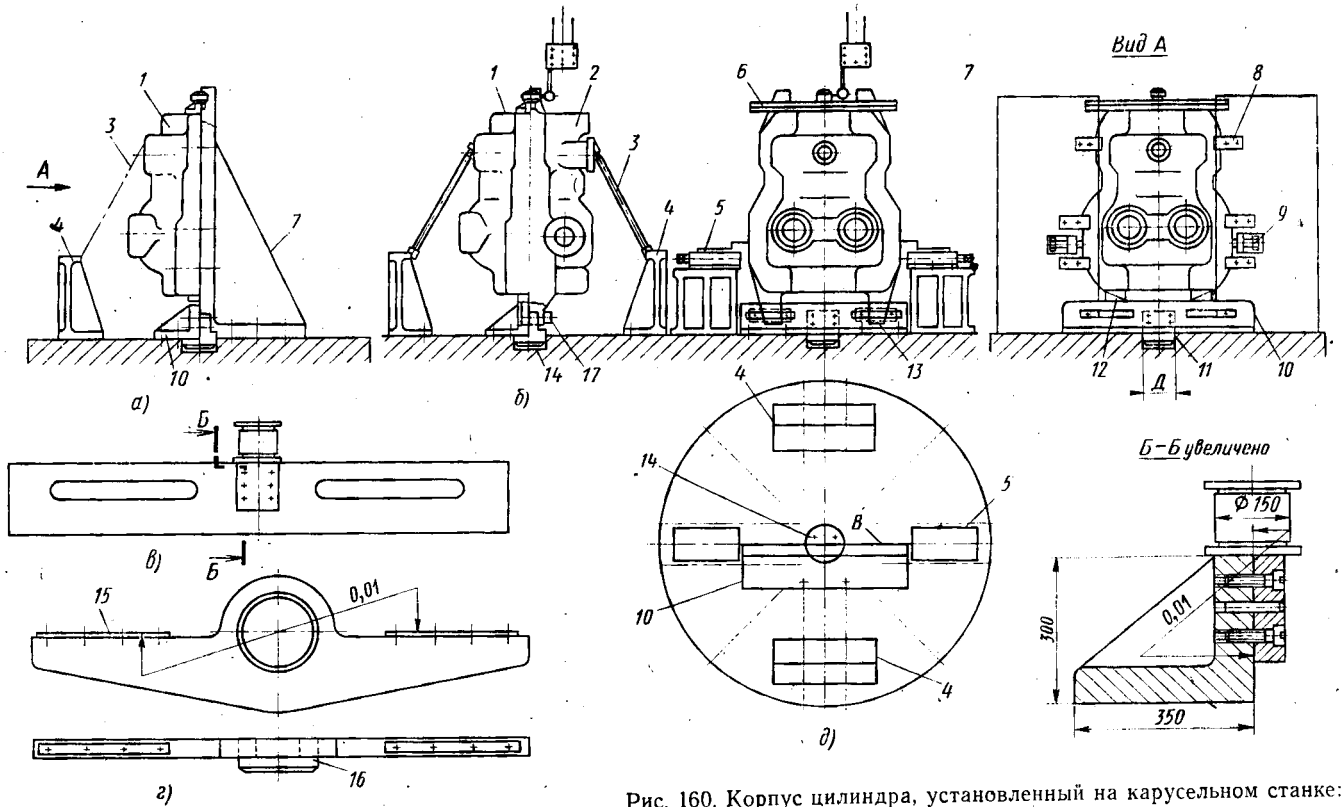


Рис. 160. Корпус цилиндра, установленный на карусельном станке:

а — для растачивания по половинам; б — для растачивания в сборе; в — центровочный угольник; г — центровочная пластина; д — схема установки деталей приспособления на планшайбе

в планшайбе, применяют также угольники с цапфой, укрепленной на угольнике, как показано на рис. 160, *в*. При такой конструкции угольника может быть достигнута еще более высокая точность установки, со смещением не более 0,03 мм. По достижении указанной точности угольник закрепляют на планшайбе и фиксируют коническими штифтами, после чего производят контрольную проверку установки. Преимущество данной конструкции угольника заключается в том, что его устройство не зависит от диаметра установочного отверстия в планшайбе станка.

Вместо угольников применяют также пластины, показанные на рис. 160, *г* с центрирующими цапфами *16*. Высокая точность совпадения контрольных поверхностей линеек *15* с диаметральной плоскостью цапфы обеспечивается за счет технологичной конструкции пластин, допускающей возможность изменения толщины линеек шлифованием их по замерам при сборке.

Метод раздельного растачивания половин корпусов турбин (рис. 160, *а*) обеспечивает более легкий доступ в зону обработки и дает возможность быстрее производить необходимые замеры. Для раздельной установки половин корпусов могут применяться угольники *7*, положение которых также определяется с помощью угольника *10* или пластин, показанных на рис. 160, *г*. Крепление обрабатываемой детали к угольникам осуществляется планками *8*, а центрирование и закрепление их — винтовыми упорами *9*.

Применение угольников *10* обеспечивает сравнительно быструю и точную установку половин корпусов на станке. Плоскости угольников должны точно совпадать с осью планшайбы. Применяемые при раздельной обработке половин крупных корпусов угольники *7* должны быть достаточно массивными и тяжелыми. В противном случае под действием веса обрабатываемой детали и возникающих в процессе работы станка центробежных сил угольники будут деформироваться, а следовательно, и нарушится точность установки детали.

Чистовое растачивание цилиндров должно обеспечить точное соблюдение осевых размеров, допуск на которые колеблется от 0,05 до 0,1 мм. Выполнение этой операции осложняется тем, что замеры нужно производить на значительной глубине (более 1500 мм) штихмасом между линейкой, заложенной в паз, и базовой плоскостью. При этом рабочий должен каждый раз останавливать станок и проникать внутрь детали. Это неудобно и утомительно, а постоянное нахождение рабочего внутри цилиндра при обработке не может быть допущено по условиям техники безопасности труда.

С целью облегчения работы на станке устанавливают индикаторные упоры (рис. 161). Нижний неподвижный упор *5* укрепляют на суппорте станка *4*. Верхний подвижной упор *3* перемещают по пазу планки *1*, прикрепленной к ползуну суп-

порта *11*, и закрепляют в определенном положении. После установки индикатора на нуль верхний упор перемещают вместе с резцом *7*, закрепленным в резцедержателе *10*. Ножка верхнего упора соединена с индикатором *2*, который при нажиме на штихмас показывает величину отклонения. Штихмас устанавливают по оси *6* и закрепляют в специальной призме между упорами.

Настройку упоров на нуль производят следующим образом. После обработки верхнего торца корпуса *8* по разметке, не сбивая резца *7*, устанавливают разрыв между упорами на величину *А* по штихмасу за счет соответствующего перемещения верхнего упора. В данном случае этот размер соответствует размеру до установочной базы *I*. Обработку торцов пазов производят последовательно сверху вниз в порядке, указанном цифрой при букве *А*, при соответствующей смене штихмасов. Последнюю проточку проверяют соприкасанием упоров; в этом случае $А = 0$. Затем, не сбивая резца, передвигают верхний упор по штихмасу до размера, соответствующего установочной базе *II*, и таким же способом, как описано выше, растачивают последующие выточки по размерам *Б*.

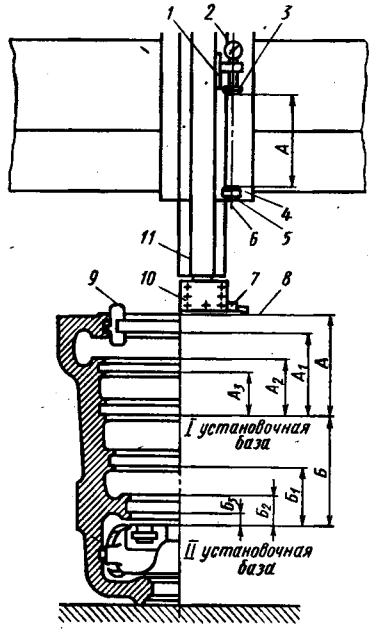


Рис. 161. Схема растачивания пазов цилиндра на карусельном станке по индикаторным упорам

Чтобы перейти к обработке верхних торцов пазов, резец *7* устанавливают по переходному шаблону *9* таким образом, чтобы кромка резца касалась верхней стороны паза шаблона; при этом положении настраивают индикаторные упоры на нуль. Так как все пазы имеют одинаковую ширину, штихмасы остаются теми же, смещается только нулевая точка настройки паза. Схема растачивания показывает порядок применения шаблонов.

11. Особенности обработки сварных корпусов паровых и газовых турбин

Выхлопные части цилиндров паровых и газовых турбин большой мощности имеют значительный вес и габаритные размеры. Так, например, размеры выхлопной части турбины К-200-130 (рис. 162) составляют по длине около 3000 мм, по ши-

рине 9000 мм и по высоте около 6000 мм. Изготовляемые из стальных листов, эти части не являются достаточно жесткими и могут деформироваться как под влиянием собственного веса, так и от действия внешних сил, например при закреплении на станках под обработку. Упругие деформации, допущенные при установке, вызывают искривление общей линии оси расточки после открепления детали и снятия ее с расточного станка. Это искривление обнаруживается на сборке в виде несоосности

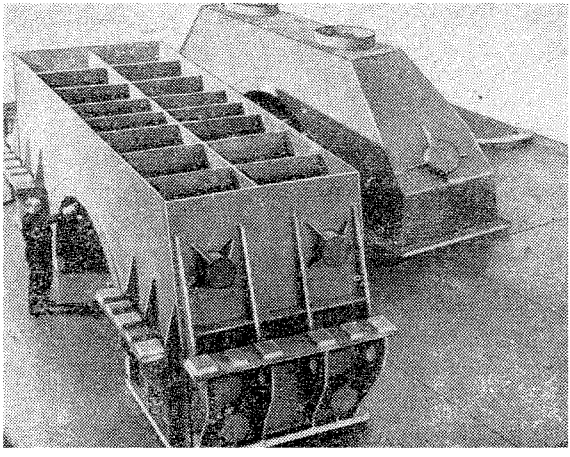


Рис. 162. Верхняя и нижняя половины выхлопной части цилиндра турбины мощностью 300 МВт

внутренних расточек под вкладыши, обоймы, уплотнения и другие элементы корпуса турбин.

Растачивание выхлопных частей производят как на расточных, так и на карусельных станках любым из описанных выше методов. Однако, как показывает опыт, наиболее целесообразным методом обработки (и особенно внутреннего растачивания) таких нежестких конструкций является растачивание их на цилиндро-расточных станках с установкой на конструкторские базы, т. е. на те поверхности, которые служат опорами детали в работающей турбине. При этом установку следует производить на динамометрах, добиваясь равенства реакций на симметричных опорах, как это делается при монтаже турбин на заводском стенде или на электростанциях. Такой метод позволяет исключить ошибки от упругих деформаций из-за различных способов установок деталей на станках и при монтаже турбин. Растачивание выхлопной части на расточном станке с помощью навесных суппортов показано на рис. 163.

Корпусы газовых турбин и осевых компрессоров, также свариваемые из листовой стали,— представляют собой еще менее жесткие детали. Для их обработки приходится изготовлять особые приспособления или применять специальные жесткие каркасы — спутники. Будучи закрепленной в таком спутнике, деталь проходит все виды обработки и освобождается из него только после полного окончания всех процессов обработки.

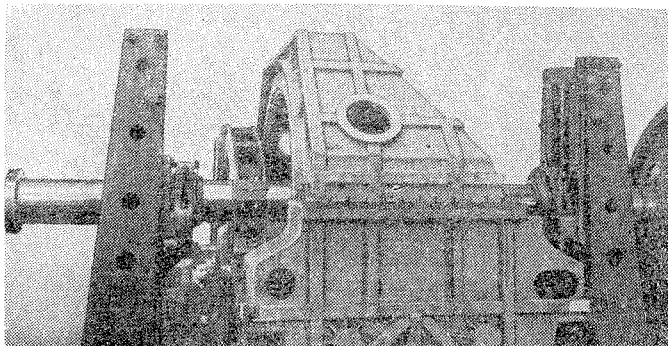


Рис. 163. Растачивание выхлопных частей турбин на расточном станке

Описанные выше методы обработки корпусов непрерывно совершенствуются.

Среди наиболее прогрессивных из возможных решений можно назвать, например, следующие:

а) сверление отверстий на горизонтальных разъемах цилиндров высокого давления методом трепанации, т. е. кольцевыми сверлами;

б) раскатка посадочных поверхностей под вкладыши роликовыми раскатками на карусельных и расточных станках, что создает наклеп, уменьшает шероховатость обрабатываемых поверхностей, повышает эксплуатационные качества подшипников;

в) применение гидроусилителей для крепления корпусов под обработку на станках, а также гидрошайб для крепления резцов, что механизирует и значительно облегчает труд станочников, особенно на крупных станках.

Наиболее крупным мероприятием является внедрение нового прогрессивного оборудования и агрегатных станков, специально изготовляемых для турбиностроительной промышленности. Так, например, агрегатный станок ЛР-190, внедренный на ЛМЗ, представляет собой соединение фрезерного, расточного и сверлильного станков. Применение такого станка позволяет с одной установки одновременно выполнить несколько трудоемких

операций — обработку плоскостей разъема, сверление отверстий на разъеме, растачивание их и нарезание резьбы. Совмещение нескольких трудоемких операций при значительном сокращении вспомогательного времени на установки и переустановки обрабатываемых деталей дает значительное сокращение трудоемкости и цикла производства турбин.

12. Гидравлические испытания корпусов турбин

Корпус турбины в процессе ее работы находится под непрерывным воздействием высоких температур и давлений пара. Гидравлические испытания предназначены для проверки прочности и плотности стенок корпусов турбин, а также плотности сопряжения их частей по горизонтальным и вертикальным разъемам.

Гидростатическое давление при испытании должно быть в 1,5—2 раза выше рабочего давления пара. Этим компенсируется разность температурных условий в работающей турбине и при гидроиспытании. Отливки подвергаются испытанию, как правило, только один раз — после окончательной механической обработки, но иногда (при плохом качестве литья) и дважды: первый раз — после предварительной и второй — после окончательной механической обработки.

Гидравлическое испытание после предварительной обработки предназначено для заблаговременного выявления дефектов отливки и исправления их заваркой. Это особо важно при крупных дефектах, когда требуется наплавка большого количества металла и последующая термическая обработка для снятия внутренних напряжений. Мелкие дефекты, вскрывающиеся при окончательной обработке, могут быть исправлены заваркой без последующей термической обработки.

При гидравлическом испытании все отверстия в корпусе плотно закрываются заглушками. Между сопрягаемыми плоскостями заглушек и корпуса прокладывают, в зависимости от величины давления при испытании, плотный картон, резину или другой прокладочный материал. Иногда в стыках, при больших габаритных размерах уплотняемых фланцев и небольших давлениях испытания, прокладочным материалом может служить асбестовый или набивочный сальниковый шнур диаметром 10—25 мм, пропитанный смесью графита с маслом. У разъемных деталей, где проверяется плотность мест сопряжения, установка прокладок не допускается (например, на горизонтальных и вертикальных разъемах корпуса турбины при окончательном гидравлическом испытании).

Время, необходимое для осмотра детали при гидравлическом испытании, устанавливается не более 30 мин. Все места, в которых обнаруживается течь или просачивание отдельных капель воды, помечают краской.

Исправление дефектных мест в стенках стальных отливок производится электросваркой. Применение ввертышей с последующей их расчеканкой менее надежно, поэтому в отдельных случаях это допускается, но, как правило, не рекомендуется. Подчеканка стенки в местах просачивания воды на стальных и чугунных отливах не разрешается, так как действие расчеканки распространяется на незначительную глубину стенки, и при работе турбины вновь образуется неплотность.

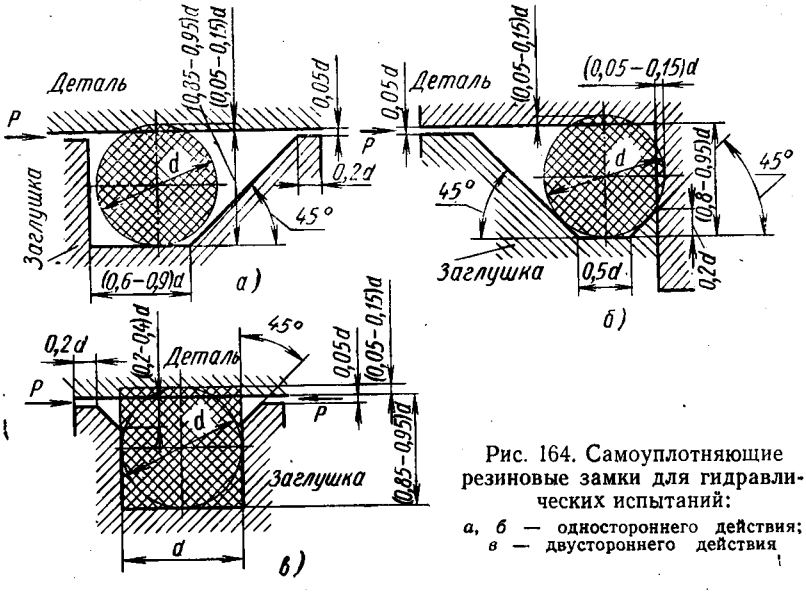


Рис. 164. Самоуплотняющие резиновые замки для гидравлических испытаний:

а, б — одностороннего действия; *в* — двустороннего действия

Наиболее ответственной частью процесса подготовки гидравлического испытания является обеспечение надежного уплотнения сопрягаемых поверхностей. В настоящее время для испытания корпусов паровых турбин с высокими параметрами пара и высокими рабочими давлениями при гидравлическом испытании применяются испытательные давления до 6000 Н/см^2 (600 кгс/см^2) и выше. Поэтому создание особо надежной конструкции заглушек и уплотняющих замков приобретает особое значение.

Ленинградским металлическим заводом разработаны новые конструкции приспособлений для гидравлического испытания корпусов турбин под высоким давлением. Надежное уплотнение в этих приспособлениях достигается за счет применения самоуплотняющихся резиновых замков, состоящих из резиновых шнуров круглого или прямоугольного сечения. Шнуры укладываются в профильные канавки в заглушках. Такие самоуплотняющие замки при гидроиспытании выдерживают требуемое высокое давление.

На рис. 164 приведены профили канавок на заглушках для уплотнительной резины и основные размеры канавок, установленные опытным путем.

Для уплотнения торцовых плоскостей отверстий, когда имеются шпильки или болты, которые удобно использовать для крепления заглушек, применяют заглушки с самоуплотняющим резиновым замком (рис. 165). В этом случае не требуется производить сильной затяжки заглушки. Замок позволяет надежно испытывать деталь даже в том случае, когда под влиянием давления на заглушку между нею и деталью возникает зазор до 0,5—1 мм, в зависимости от диаметра резинового шнура.

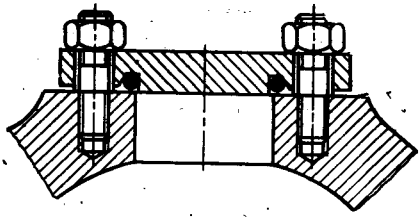


Рис. 165. Заглушка с самоуплотняющим резиновым замком для гидравлических испытаний

Рис. 166 дает представление о конструкции заглушек для деталей, имеющих внутренний бурт. Здесь заглушка закрепляется силой P внутреннего давления. Сила P воспринимается буртом заглушки, опирающимся на бурт испытуемой детали.

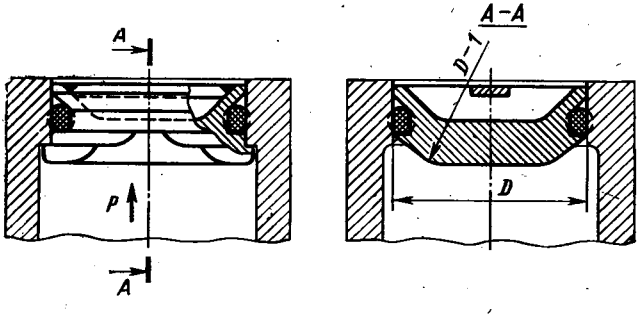


Рис. 166. Схемы уплотнений при гидравлическом испытании деталей, имеющих внутренний бурт

Если не представляется возможным поставить заглушку через внутреннюю полость детали, то заглушка изготовляется так, чтобы ее можно было завести через наружное отверстие, несмотря на наличие буртов как на заглушке, так и на детали. В этом случае с заглушки удаляется (путем точения) часть металла в направлении, перпендикулярном плоскости упора. В силу этого заглушка, будучи повернутой на 90°, свободно заводится в отверстие детали с последующим разворачиванием и подтягиванием ее к упору.

При эксплуатации турбины давление пара вдоль корпуса неодинаковое и постепенно понижается от места впуска пара к его выходу. Поэтому нет надобности, да и нельзя, испытывать весь корпус на одинаковое высокое давление. Обычно корпус по длине разделяется заглушками на ряд отдельных полостей (камер), которые испытываются на различные давления. При

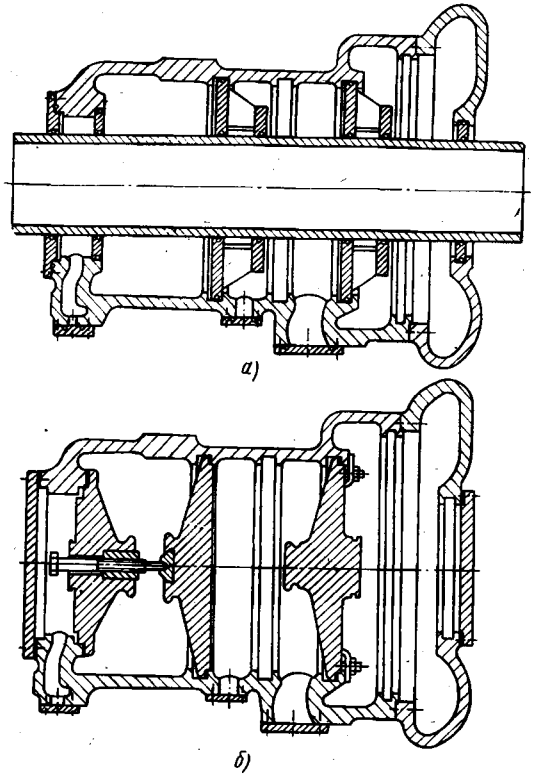


Рис. 167. Схема уплотнений при гидравлическом испытании отдельных камер корпуса турбины:
а — с центральной макетной трубой; *б* — с заглушками полного сечения

рассмотрении схем уплотнения отдельных камер (рис. 167) предпочтение следует отдать схеме, показанной на рис. 167, *а*. Центральная труба, показанная в этой схеме, имитирует ротор турбины и разгружает стенки корпусов при гидроиспытании от чрезмерно завышенных продольных напряжений, имеющих место при испытании по второй схеме (рис. 167, *б*). Кроме того, при испытании по первой схеме сокращается цикл сборки под испытание, уменьшается время на изготовление уплотнительных прокладок и сокращаются затраты на изготовление заглушек.

В процессе выполнения гидравлических испытаний необходимо тщательно соблюдать все особые требования техники безопасности при работе с сосудами, находящимися под давлением, на что имеются специальные инструкции, утверждаемые Госгортехнадзором.

Глава XV. ПОДШИПНИКИ ТУРБИН

1. Вкладыши опорных и опорно-упорных подшипников

К вкладышам подшипников предъявляются жесткие требования в отношении малых потерь на трение, прочности в работе и долговечности.

Для уменьшения потерь на трение вкладыши заливают лучшим антифрикционным сплавом — баббитом. Нижние половины вкладышей подвергаются наибольшему давлению и подлежат заливке баббитом марки Б83 (по ГОСТу 1320—55), в котором количество олова составляет около 83%. Верхние половины вкладышей стационарных турбин по условиям работы (в отличие от судовых турбин) можно было бы заливать менее качественным, но зато более дешевым, баббитом Б16, в котором основа является свинцовой, а количество олова составляет всего 16%. Однако применение в этом случае баббита Б16 часто на практике приводит не к экономии средств, а, наоборот, к большим потерям, главным образом из-за смешивания Б83 с Б16 при растачивании вкладышей. Наряду с этим создается опасность загрязнения баббита Б83 баббитом Б16 и на заливочном участке, а кроме того, исключается возможность центробежной заливки вкладышей. Поэтому лучше всего использовать только одну марку баббита — Б83 как для нижних, так и для верхних половин вкладышей подшипников.

Подшипники турбин можно разделить на две основные группы: опорные и опорно-упорные. Вкладыши опорных подшипников бывают нерегулируемые (рис. 168) и регулируемые (рис. 169). Регулировка положения вкладышей осуществляется изменением толщины прокладок *2* между телом вкладыша и опорными подушками *1*. Таких подушек обычно бывает четыре: три в нижней половине и одна в верхней.

Нерегулируемые вкладыши плотно устанавливаются в расточке корпуса подшипника, а смещение оси отверстия вкладыша, необходимость чего может возникать при центровке ротора турбины, достигается за счет эксцентричного растачивания отверстия во вкладыше. Вкладыши такой конструкции применяются в основном на вспомогательных механизмах и в судовых турбинах. У некоторых вкладышей такой конструкции по обеим сторонам имеются выточки *K* (см. рис. 168) или выступы, кото-

рые обрабатывают при окончательном растачивании отверстия после подгонки по месту наружных посадочных поверхностей вкладыша. Эти выточки расположены концентрично отверстию и являются контрольными.

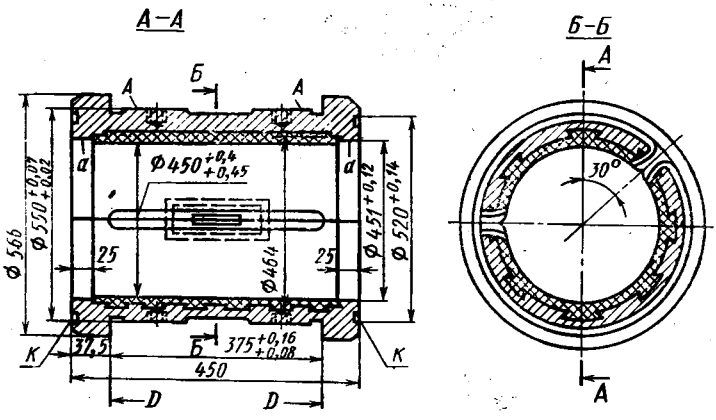


Рис. 168. Опорный нерегулируемый вкладыш

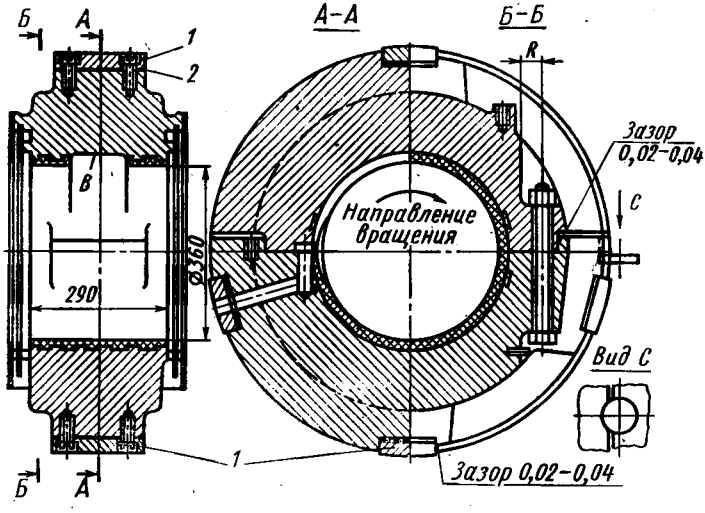


Рис. 169. Опорный регулируемый вкладыш

Некоторые вкладыши судовых турбин, как например, показанный на рис. 168, имеют с обоих концов также бронзовые пояски *а* шириной 10—25 мм, не заливаемые баббитом. Пояски эти предназначены для предупреждения оседания ротора в случае выплавления баббита и протачиваются по диаметру, большему, чем диаметр расточки по баббиту, на 1,5 мм.

В конструкциях вкладышей, несмотря на их внешнее различие, имеется много однотипных элементов, порождающих общность технологических задач при их обработке.

Рассмотрим, в качестве примера, типовой технологический процесс обработки вкладыша, показанного на рис. 169. Вкладыши отливаются из чугуна СЧ 21-40, стали 25Л или из бронзы — в зависимости от условий работы (например, из бронзы изготовляются вкладыши подшипников судовых турбин). Наиболее целесообразным видом заготовок является литье из двух половин, но применяются также и кованые заготовки. На механическую обработку заготовки поступают термически обработанными.

Этапы обработки вкладыша в порядке их выполнения приведены ниже.

1. Обрубка и тщательная очистка литья в дробеструйных камерах.

2. Строгание или скоростное фрезерование разъемов верхней и нижней половин.

3. Припиловка разъемов и сборка двух половин в хомут для точения.

4. Предварительная обработка снаружи и по торцам с припуском по 5 мм на сторону. Отверстие растачивается по наименьшему диаметру с припуском 10 мм на сторону.

5 и 6. Разметка и предварительное сверление отверстий в разъемах. В верхней половине отверстия под контрольные болты сверлятся с припуском 4 мм на диаметр. Обе половины стягивают хомутом и через отверстия в верхней половине обрабатывают отверстия в нижней половине (после выполнения этапа 17).

7. Фрезерование выемок радиусом R в обеих половинах для головок болтов. Высоту выемок выдерживают от плоскостей разъемов.

8. Рассверливание отверстий, имеющих свободный размер, в плоскости разъемах обеих половин.

9. Припиловка разъемов обеих половин и сборка их на болты.

10. Окончательная обработка под заливку баббитом и предварительная обработка снаружи с припуском 3 мм на сторону.

11 и 12. Разметка и долбление пазов для подушек с припуском 0,2 мм на сторону.

13 и 14. Разметка и сверление отверстия для подвода масла в нижней половине.

15. Заливка баббитом раздельно по половинам. Места, подлежащие заливке, ограничиваются по торцам вкладыша полукольцами, соединенными между собой центральными болтами. Для получения требуемой толщины слоя баббита, между полукольцами зажимают на одинаковом расстоянии от стенок вкладыша лист железа, выгнутый по цилиндру.

16. Строгание или фрезерование плоскостей разъема и установочных площадок. Пригонка пазов по подушкам и шабрение оснований пазов и подушек. Клеймение номеров пазов и подушек. Плоскости разъемов тщательно шабрятся; допускается зазор не свыше 0,05 мм. Такая пригонка вызвана необходимостью устранения протечки масла наружу через стыки половин вкладышей. Пригонка осуществляется с зазором не свыше 0,03 мм.

17. Разметка отверстий в пазах по отверстиям подушек.

18. Сверление отверстий в пазах для крепления подушек; сверление и развертывание отверстий под контрольные болты в плоскостях разъема. Обе половины собирают на болты. Вначале сверлят и развертывают два диаметрально противоположных отверстия, устанавливают в них контрольные болты и затем сверлят и развертывают остальные отверстия.

19. Нарезание отверстий для крепления подушек, установка подушек и контрольных болтов. Подушки устанавливают согласно клеймению. Под каждую подушку подкладывают по две прокладки толщиной 2 мм.

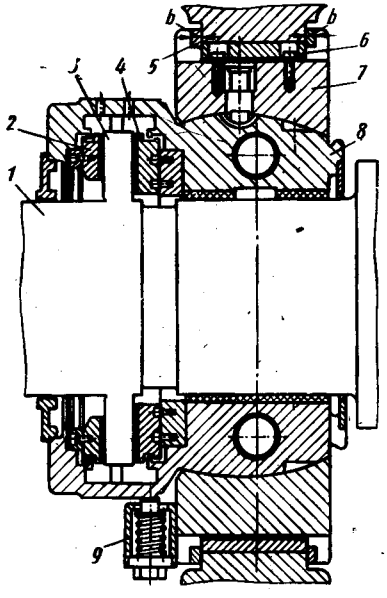


Рис. 170. Комбинированный опорно-упорный подшипник и его установка в корпусе:

1 — вал; *2* — установочные колодки; *3* — упорный диск; *4* — рабочие колодки; *5* — установочные полукольца; *6* — подушки; *7* — обойма шаровая; *8* — опорная часть вкладыша; *9* — амортизатор; *b* — размеры установочных колец, выдерживаемые при сборке по замерам с места

20. Окончательное растачивание отверстий и обтачивание вкладышей снаружи. Подрезка торцов согласовывается с данными паспорта растачивания под заливку. Такая увязка необходима для обеспечения определенной толщины слоя баббита в торцовой плоскости.

21. Разборка вкладыша на две половины.

22. Растачивание в верхней половине выемки *В*.

23 и 24. Разметка всех отверстий на торцовых поверхностях, на разъемах и под разделку масляных карманов; сверление отверстий.

25 и 26. Фрезерование канавок и масляных карманов; нарезание отверстий и разделка масляных карманов.

27. Контроль ОТК.

На рис. 170 изображен комбинированный самоустанавливаю-

щийся вкладыш переднего опорно-упорного подшипника в сборе с обоймой. Заготовка для вкладыша отливается из двух половин. Материал заготовки — серый чугун марки СЧ 32-52 или сталь 30Л. Обработка этого вкладыша, имеющего шаровую наружную поверхность, аналогична обработке вкладыша с цилиндрической поверхностью. Рассмотрим только те операции, которые различны вследствие конструктивных особенностей этих типов вкладышей.

При обточке вкладыша под заливку отверстие обрабатывается окончательно — торцы с припуском 5 мм на сторону, а шаровая сфера с припуском 2 мм на сторону. Обработка производится на токарном или карусельном станке при использовании копира. При внедрении шлифования шаровых поверхностей отпадает необходимость в достижении высокой точности шаровых поверхностей после точения. Для последующего шлифования оставляют припуск 0,15—0,25 мм на сторону. Бо́льшие припуски оставлять не следует, так как это увеличило бы трудоемкость шлифования.

Проверка диаметра шара производится микрометром по трем направлениям: посередине обработанного участка сферы и двум крайним точкам.

2. Вкладыши гребенчатых и сегментных упорных подшипников

Упорные подшипники воспринимают осевое давление ротора и не допускают его перемещений в осевом направлении.

Наиболее распространенными в турбиностроении типами упорных подшипников являются гребенчатые вкладыши и сегменты Мичелла, однако в отечественных турбинах гребенчатые вкладыши не применяются. Подшипники Мичелла имеют большое применение в современных крупных турбинах. Основной принцип их действия заключается в разделении опорной поверхности на ряд сегментов с целью получения клинообразных масляных слоев.

Изображенный на рис. 170 комбинированный опорно-упорный подшипник является типичным представителем сегментных подшипников системы Мичелла. Установочные *2* и рабочие *4* колодки называются также сегментами. Они расположены по обеим сторонам упорного гребня и воспринимают двусторонние осевые усилия. Рабочие поверхности сегментов залиты баббитом. Входные кромки сегментов закруглены во избежание нарушения масляного слоя. Толщина слоя баббита в сегментах должна быть меньше минимального осевого зазора. Ниже приводится технология обработки сегмента упорного подшипника этого типа (рис. 171).

Сегменты имеют ряд канавок в сечении, имеющим вид ласточкина хвоста, что обеспечивает лучшее крепление слоя бабби-

та. Канавки *1* расположены в определенном интервале друг от друга по окружности, а канавки *2* расположены в радиальном направлении. При обработке плоскостей *3* и *4* непараллельность допускается в пределах 0,02 мм, а разница в толщине колодок одного комплекта по размеру $70^{+0,25}$ мм не должна превышать 0,01 мм. Заготовка для колодки берется в виде кольца. Материал — латунь марки ЛМцА 57-3-1 и баббит Б83.

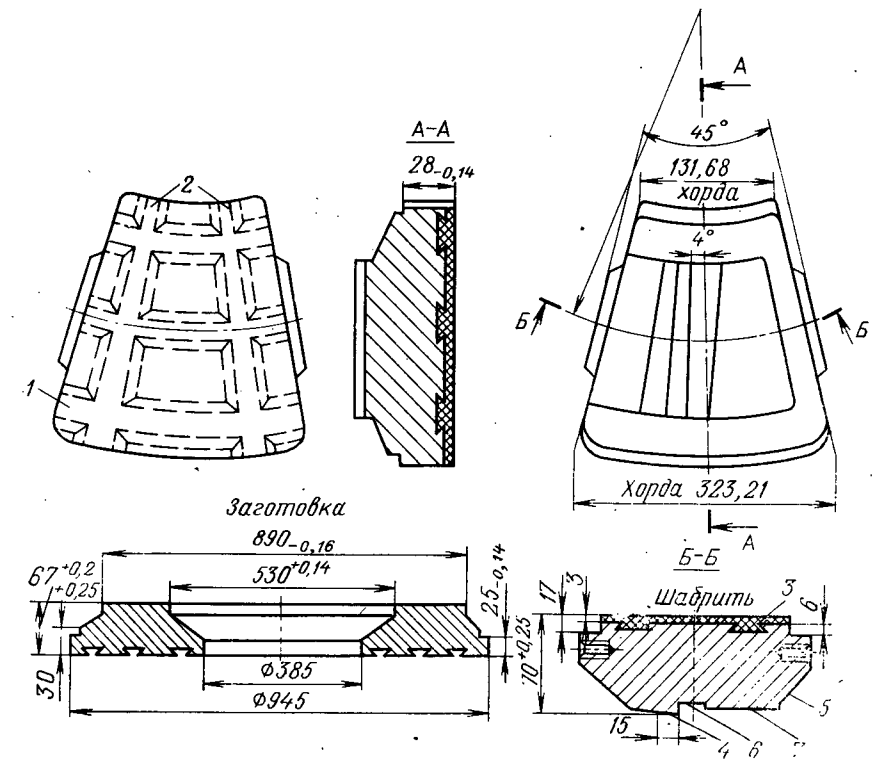


Рис. 171. Сегмент главного упорного подшипника судовой турбины

Порядок этапов обработки сегментов следующий.

1. Обтачивание кругом предварительно с припуском 2 мм на сторону. Обработка ведется только по цилиндрическим поверхностям и выполняется (учитывая крупные размеры деталей) на карусельных станках.

2. Обтачивание окончательное. Кольцо устанавливается канавками вниз и крепится кулачками в распор по диаметру 385 мм. Обрабатывают наружную поверхность и контур верхней торцовой плоскости (диаметры $890_{-0,16}$; $530^{+0,14}$ и скосы). Обрабатывают торцовую плоскость со стороны канавок, т. е. снизу, на длину 10 мм, как базу для установки при последующей

обработке. Кольцо переставляют в кулачках обработанной торцовой плоскостью вниз; установку проверяют индикатором по наружному диаметру и по обработанному пояску (10 мм) торцовой плоскости со стороны канавок. Обрабатывают верхний торец, строго выдерживая аксиальные размеры $25_{-0,14}$ и $67^{+0,2}_{+0,25}$, и по окружности прорезают канавки *1*. Канавки сначала прорезают прямыми прорезными резцами, а затем резцами по форме ласточкина хвоста. Работа ведется на карусельном станке.

3. Разметка радиальных пазов *2* и мест разрезки на сегменты. На торцовой плоскости, не подлежащей заливке, наносят риски для окончательного строгания боковых сторон под углом 45°. Контур размечают по шаблону.

4. Строгание пазов *2* под заливку и разрезка кольца на две половины. Работа ведется на продольно-строгальном станке. Если пазы *2* не сквозные, то их фрезеруют после разрезки кольца на сегменты.

5. Разрезка на долбежном станке полуколец на сегменты и обработка их по контуру. При малых габаритах колец операции 4 и 5 выполняют на горизонтально-фрезерном станке. Обработку по контуру выполняют в последующих операциях или по разметке на вертикально-фрезерном станке или на горизонтально-фрезерном профильной фрезой.

6. Разметка скосов *5* со стороны торцовой плоскости, не заливаемой баббитом, и отверстий для крепления рымов.

7. Фрезерование уступов по размеру 17 мм.

8. Строгание скосов *5* на продольно-строгальном станке. При этом сегменты устанавливают в один ряд и производят одновременно снятие скоса по шаблону.

9. Сверление и нарезание резьбы в отверстиях для крепления рымов и опиливание острых кромок.

10. Заливка сегментов баббитом. Перед заливкой поверхность сегментов тщательно зачищают и производят лужение мест, подлежащих заливке. Сегмент устанавливают в формочку, изготовленную из листового железа по его контуру. В местах прилегания формочки к сегменту прокладывают листовой асбест для устранения утечек баббита. Сегмент нагревают до температуры 200—250° С и заливают баббитом с припуском 4—6 мм.

11. Обработка плоскости, залитой баббитом. Во время точения аксиальный размер $28^{+0,14}$ выдерживают с допуском $28^{+0,2}_{+0,1}$. Обработку ведут на карусельном станке, установив несколько сегментов по окружности планшайбы станка. Крепление производят планками, прижимающими сегменты к планшайбе за уступы размером 17 мм. Одна планка прижимает одновременно два уступа двух соседних сегментов. Обработку ведут в две установки: сначала протачивают баббит, выдерживая размер 28, а затем зачищают опорную плоскость *4* в размер $70^{+0,25}$.

12 и 13. Разметка и фрезерование выемок *6* и *7* в плоскости, не залитой баббитом.

14. Шабрение плоскости, залитой баббитом. При этом выдерживают размер $28^{-0,14}$. Толщину сегментов проверяют индикатором, установленным на плите. Разность толщин в комплекте колодок не должна превышать 0,01 мм. Баббит проверяют на прочность приставания к телу колодки, например с помощью керосина. При отставании баббита от поверхности основного металла сегментов керосин появляется в образующихся щелях.

3. Заливка вкладышей баббитом

Заливка вкладышей баббитом — весьма ответственная операция, требующая точного соблюдения технологических режимов. При несоблюдении правил заливки наблюдаются случаи отставания баббита от тела вкладыша, появления трещин, раковин и других дефектов, в результате чего вкладыш становится непригодным для эксплуатации. Заливке предшествуют обезжиривание, травление и лужение.

Процесс обезжиривания проводится для удаления масла и керосина. После механической обработки вкладыш погружают на 15—20 мин в ванну с 10—15%-ным раствором каустической соды, нагретым до 80—90° С. После этого его счищают стальной щеткой и промывают в горячей проточной воде для удаления грязи и щелочи. Если вкладыш имеет необрабатываемые поверхности, то он предварительно очищается в пескоструйной камере. Далее вкладыш промывают и подвергают травлению.

Лужение обеспечивает лучшее соединение баббита с поверхностью вкладыша. Процесс лужения может быть осуществлен двояким способом: погружением всего вкладыша в ванну с расплавленным сплавом (50% олова и 50% свинца) или смазыванием паяльником тех поверхностей, на которые будет наплавляться баббит.

Вкладыши диаметром 150—400 мм рекомендуется заливать центробежным способом. Вкладыши диаметром до 150 и свыше 400 мм необходимо заливать вручную, по отдельности каждую половину. Заливка вкладышей ручным способом производится при помощи приспособления (рис. 172). К торцам полуцилиндра прижимают полукруглые листы. Один лист при помощи планки опирается на торцовые плоскости вкладыша. Оба приставных листа прижимают к торцовым плоскостям вкладыша стяжным винтом. Полуцилиндр является стержнем при заливке и определяет толщину слоя баббита.

Припуски на механическую обработку вкладышей и рабочих колодок (сегментов Мичелла) надо оставлять наименьшими. Практически достижимыми можно считать припуски 2—5 мм на сторону, в зависимости от размеров вкладышей.

Качество баббита тем лучше, чем меньше он находится в расплавленном состоянии. Плавку баббита производят в электропечи. Температура баббита перед заливкой должна быть в пределах 300—400° С. Нагрев контролируется пирометром. Поверхность расплавленного баббита защищают от окисления, посыпая ее измельченным сухим древесным углем, который должен быть просеян и очищен от пыли. Окислы, попадая в сплав, вызывают растрескивание баббита и отставание его от вкладыша. Перед заливкой вкладыш подогревают,

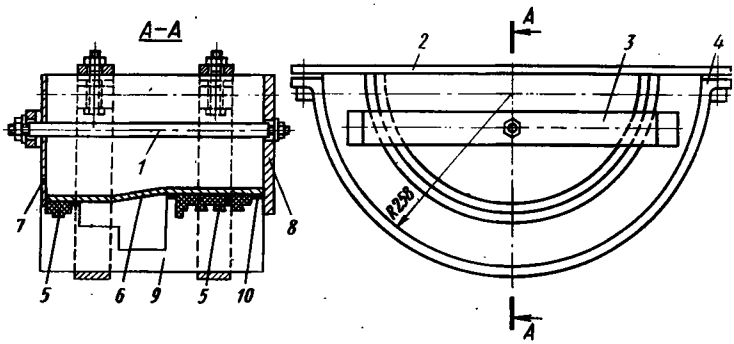


Рис. 172. Приспособление для заливки вкладыша баббитом:
1 — стяжной винт; *2, 3* — планки; *4* — хомут; *5* — слой баббита; *6* — полуцилиндр; *7* и *8* — полукруглые приставные листы; *9* — заливаемый вкладыш; *10* — асбестовая прокладка

для чего собранный вкладыш помещают в электропечь или подогревают на горне до температуры 200—220° С. Одновременно подогревают и приспособление. Затем вкладыш погружают в ванну для лужения. Холодный или малонагретый вкладыш не рекомендуется заливать баббитом. Такая заливка дает мелкозернистое строение баббита, но он не достаточно прочно сцепляется с телом вкладыша.

4. Шаровые обоймы опорно-упорных вкладышей

Обоймы (рис. 173) предназначаются для установки в них вкладышей с шаровой поверхностью. Обойма устанавливается в цилиндр посадочными плоскостями подушек, закрепленных в пазах обоймы. Заготовкой для обоймы является поковка, состоящая из двух половин; материал заготовки — сталь 25 или отливка из стали 25Л.

Обработка обоймы состоит из следующих этапов.

1. Проверка поковки и разметка разъема для фрезерования.
2. Фрезерование разъема в обеих половинах.
3. Припиловка разъемов и сборка в хомут под точение.
4. Предварительная обработка с припуском 3 мм на сторону.

5. Разметка для долбления пазов под установочные подушки, разметка на разъеме верхней половины двух отверстий диаметром 22 мм и двух отверстий диаметром 25А.

6. Долбление пазов под установочные подушки с припуском 0,3 мм на сторону.

7. Сверление в верхней половине отверстий, размеченных на разъеме. При этом отверстия диаметром 25А под контрольные болты сверлят предварительно. Затем обе половины собирают вместе, после чего отверстия в нижней половине сверлят через ранее высверленные отверстия верхней половины.

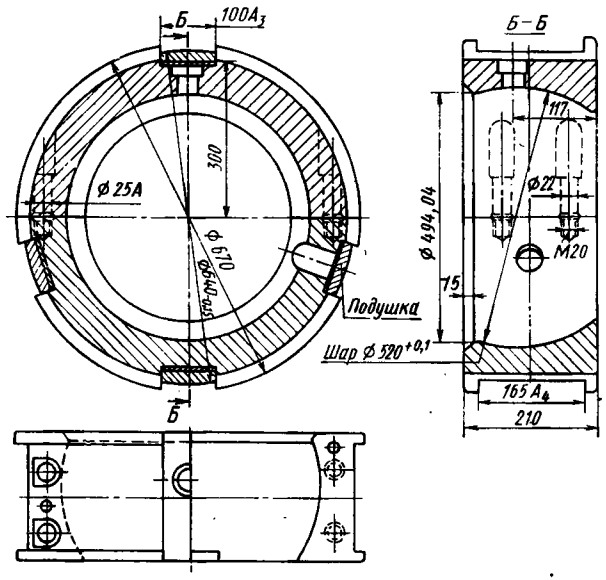


Рис. 173. Шаровая обойма вкладыша опорно-упорного подшипника

8. Фрезерование выемки под головки болтов и под две установочные площадки в каждой половине.

9. Распиливание пазов и пригонка установочных подушек; после пригонки подушки клеймят по пригнанному пазу. Шабрение разъемов обеих половин и установочных площадок. Обе половины собирают на болты.

10. Сверление отверстия в пазах по отверстиям установочных подушек. Сверление, рассверливание и развертывание отверстий диаметром 25А под контрольные болты.

11. Нарезание резьб в пазах. Шабрение плоскостей подушек, прилегающих к пазам обоймы. Подушки устанавливают по пазам и крепят болтами.

12 и 13. Разметка для точения и окончательная токарная обработка. Обойму устанавливают по установочным площадкам

при помощи индикатора. Шаровую поверхность обрабатывают с припуском 0,3—0,5 мм на диаметр.

14 и 15. Разметка и сверление остальных отверстий.

16. Шлифование сферической поверхности. Шлифование осуществляется специальным приспособлением (рис. 174) на токарном станке при частоте вращения изделия 3—4 об/мин. Приспособление применяется для шлифования внутренних и наружных сферических поверхностей.

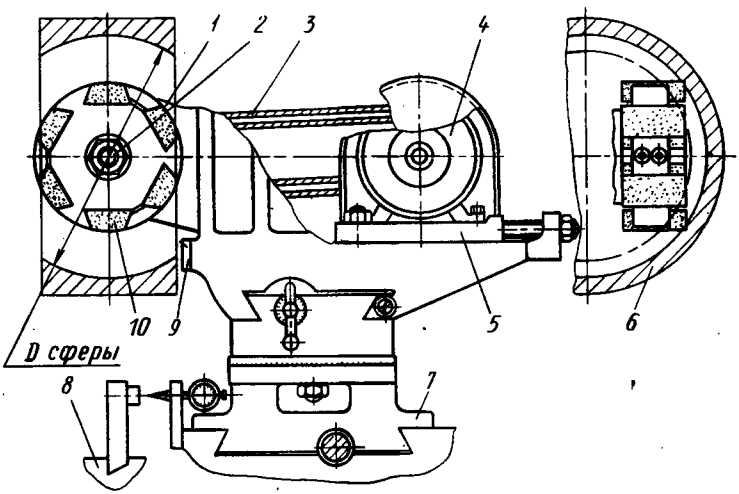


Рис. 174. Приспособление для шлифования сферы:

1 — корпус; *2* — шпиндель; *3* — клиноременная передача; *4* — электродвигатель; *5* — подушка; *6* — шлифуемая шаровая поверхность; *7* — поперечные направляющие станка; *8* — продольные направляющие станка; *9* — установочная планка; *10* — абразивные сегменты

В конструкцию приспособления заложен принцип образования окружности при сечении шара плоскостью в любом его месте. К шаровой поверхности изделия подводится чашечный шлифовальный круг так, чтобы торец его касался поверхности изделия; само изделие при этом должно вращаться вокруг своей оси перпендикулярно или под другим углом (требуемым условиями обработки) к оси круга. Такое положение обрабатываемой детали и шлифовального круга обеспечивает получение требуемой шаровой поверхности.

При установке приспособления на станок необходимо соблюдать следующее основное условие: ось вращения шлифовальной головки должна пересекать ось вращения шпинделя станка в центре шаровой поверхности. В противном случае поверхность получится искаженной. Правильно установленная шлифовальная головка должна дать сетку пересекающихся

окружных штрихов. Шпиндель шлифовального приспособления вращается с частотой 1500 об/мин.

Обработку обоймы и вкладышей необходимо вести в такой последовательности: в первую очередь обрабатывают сферическую поверхность обоймы с допуском ±0,2 мм, затем проверяют микрометрическим штихмасом фактический диаметр сферической поверхности обоймы. После этого шлифуют сферическую поверхность вкладыша по размеру обоймы с допуском 0,04 мм. Плотность прилегания сферических поверхностей обоймы и вкладыша проверяют щупом и по краске. При такой обработке достигается чистота поверхности 7-го класса.

В шлифовальном приспособлении одним и тем же кругом можно шлифовать внутренние и наружные шаровые поверхности различных диаметров, изменяя лишь расстояния от центра шара до шлифовального круга. В связи с тем, что шлифование шарового участка изделия осуществляется по всей его ширине, диаметр шлифовального круга выбирают либо немного большим ширины обрабатываемого участка, либо меньшим диаметра шаровой поверхности изделия. Шлифовальное приспособление может быть применено для шаровых поверхностей диаметром 500—600 мм и шириной 300 мм.

Установка приспособления по центру сферы изделия осуществляется при помощи индикатора, расположенного на подвижном суппорте станка. При работе приспособления должны быть соблюдены следующие условия: в направляющих станка, приспособлении и винтовых передачах не должен допускаться зазор; не должно допускаться также биения шпинделя шлифовальной головки, который должен быть отбалансирован вместе со шлифовальным кругом.

Подача шлифовального круга осуществляется радиально к центру или от центра, в зависимости от того, что обрабатывается — обойма или вкладыш. В процессе работы нельзя допускать сильного нагрева изделия. При чистовом шлифовании рекомендуется глубину резания устанавливать до 0,01 мм, т. е. шлифовать без подачи. Частота вращения изделия должна быть одинаковой при чистовой и при черновой обработках. Управление подачей производится вручную при помощи ходового винта и нониуса. Шлифованию могут подвергаться чугунные и стальные детали.

Шлифование сферических поверхностей обойм и вкладышей полностью исключает их ручную пригонку, дает высокое качество поверхности и точность геометрических форм.

5. Корпусы подшипников

Корпусы подшипников обычно изготовляют из серого чугуна марки СЧ 21-40. Чугун обладает способностью к поглощению вибраций, антифрикционными свойствами, хорошими литейными

свойствами, позволяющими получать с высокой точностью детали сложной формы без механической обработки. Однако, как показал опыт производства, более целесообразно изготовлять корпусы подшипников сварными из листовой стали марки Ст3. В эксплуатации сварные корпусы также оказались более надежными.

Требования к механической обработке корпусов подшипников аналогичны требованиям к качеству обработки корпусов цилиндров турбин. Основные из них следующие:

а) горизонтальный разъем подшипников должен быть герметичным;

б) плоскость горизонтального разъема должна совпадать с осью расточки; допустимое отклонение — не более 0,2 мм;

в) непараллельность опорной плоскости к оси расточки не должна быть более 0,1 мм;

г) торцовые плоскости расточек должны быть перпендикулярны оси расточки; допустимое отклонение — не более 0,03 мм на всей длине.

После очистки корпус и крышку подшипника размечают и обрабатывают предварительно с припуском 1,5—3 мм на сторону. После этого корпус подвергают следующей термической обработке: отжиг при температуре 500—550° С с выдержкой в печи из расчета 2 ч на каждые 25 мм толщины стенки; охлаждение с печью со скоростью 30—50° С в час до температуры 200—150° С и затем охлаждение на воздухе. Цель термической обработки — снятие внутренних напряжений.

Перед сборкой под чистовое растачивание особенно тщательно обрабатывают и пришабривают плоскости горизонтального разъема корпуса подшипника. Готовый корпус проверяют на плотность с помощью керосина.

Глава XVI. ДИАФРАГМЫ

1. Назначение, условия работы и применяемые материалы

Диафрагмы являются составной частью статора турбины. Они представляют собой перегородки между ступенями турбины с различным давлением пара; в них находятся направляющие лопатки, составляющие неподвижный элемент проточной части. Диафрагмы следует рассматривать как корпусы (или основания), главное назначение которых состоит в надежном креплении и правильной установке решеток направляющих лопаток относительно лопаток ротора турбины.

Исполнительными поверхностями диафрагм являются профильные поверхности сопловых каналов. Технология производства заготовок, механическая обработка и сборка диафрагм

должны обеспечить правильные форму и расположение сопловых каналов диафрагм в собранной турбине.

Основной базирующей поверхностью диафрагмы, с помощью которой она присоединяется к цилиндру турбины, определяя, таким образом, требуемое положение сопловых каналов вдоль оси турбины, является торцовая плоскость со стороны паровыхода (плоскость *3* на рис. 175 или плоскость *1* на рис. 176).

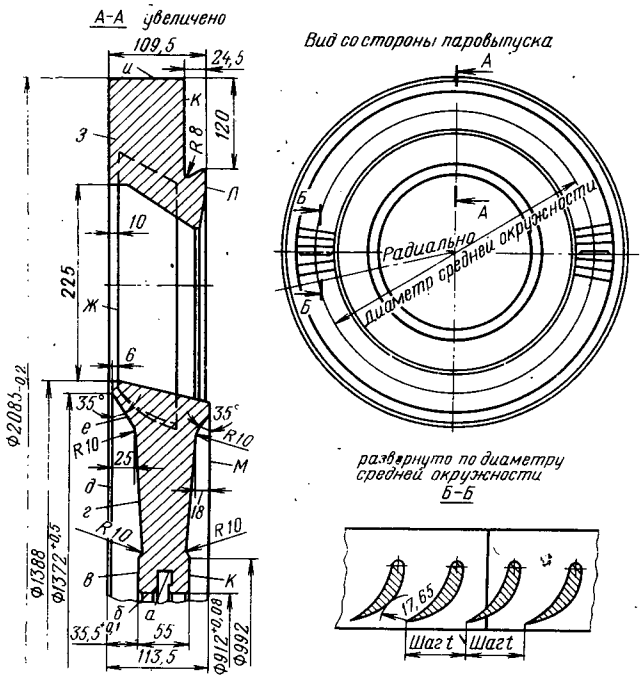


Рис. 175. Литая чугунная диафрагма

Внутренние и наружные цилиндрические поверхности диафрагм должны выполняться строго концентрично относительно средней окружности сопловых каналов, так как они являются материальными заменителями последней (в качестве основных технологических баз) при центровках диафрагмы в процессе механической обработки и сборки.

Типовые конструкции диафрагм показаны на рис. 175—178. Их можно разделить на четыре основных типа, получивших названия от способов производства, а именно: литые с прямым разъемом (рис. 175); литые с косым разъемом (рис. 176); сварные (рис. 177) наборные (рис. 178). Последние могут быть с лопатками, приклепанными к телу диафрагмы или набранными в паз.

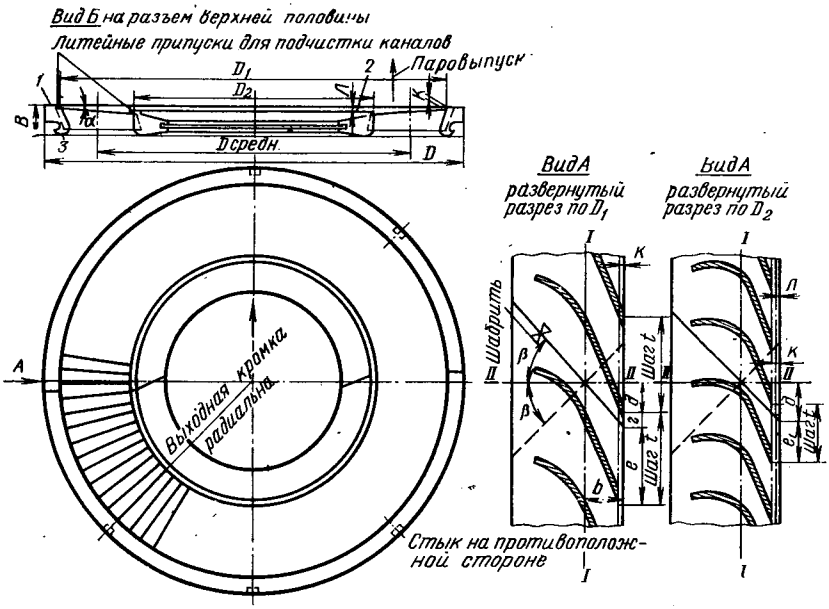


Рис. 176. Литая чугунная диафрагма с косым разъемом

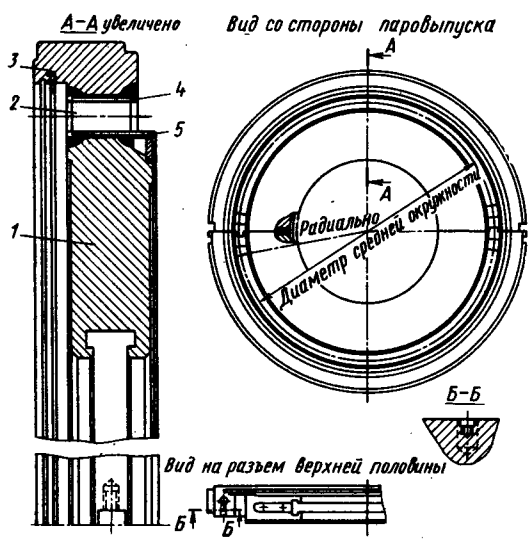


Рис. 177. Сварная диафрагма

В паровых турбинах применяются в основном литые и сварные диафрагмы, в газовых турбинах — наборные и сварные. В части низкого давления паровых турбин, в зоне температур не выше 250—300° С, применяются литые диафрагмы из чугуна марок СЧ21-40 и СЧ24-48 с залитыми в них

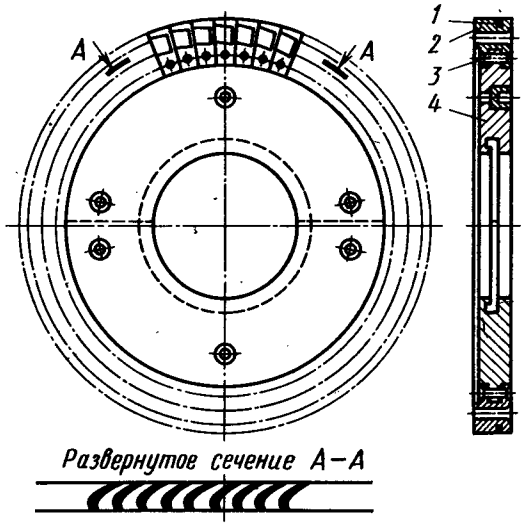


Рис. 178. Диафрагма наборная с приклепанными лопатками:

1 — бандажная полоса; *2* — лопатка; *3* — заклепка; *4* — тело диафрагмы

лопатками из малоуглеродистой нержавеющей стали 1Х13. Сварные и наборные диафрагмы изготовляются из материалов, указанных в табл. 27.

В качестве заготовок из легированных сталей в основном применяют поковки. Материал поковок подвергается контроль-

Таблица 27

Материалы сварных и наборных диафрагм

Элементы диафрагм	Рабочая температура в °С						
	450	475	550	580	650	700	750
Тела и ободья	Ст.3	12ХМ 15ХМА 20ХМА	—	12ХМФ 20ХМФ 15Х1М1Ф	—	ЭИ405	—
Лопатки	—	1Х13	1Х11МФ	ЭИ802	ЭИ612	—	ЭИ893
Бандажные ленты	Ст.3	—	1Х13	—	ЭИ405 ЭИ572	—	—

ным испытаниям на механические свойства и макроскопическому исследованию путем травления для определения отсутствия флокенов.

2. Требования к механической обработке диафрагм

Из всех элементов диафрагм, образующих их конструктивные формы, наиболее ответственными являются сопловые каналы, при помощи которых диафрагма выполняет свое основное служебное назначение — направляющего аппарата. Допускаемые отклонения по шагам и размерам каналов указаны в табл. 28. Чистота обработки профильных поверхностей каналов должна быть в пределах 8—9-го классов.

Таблица 28

Усредненные допуски на размеры каналов диафрагм

Наименование типов диафрагм	Шаги каналов в мм		Высота канала в мм	Ширина горла в мм	Суммарное проходное сечение в %
	сбоку	у разъема			
Сварные	±0,25	±4,0	±1,0	±0,15	+2 —3
Литые	±1,0	+5,0 —0,5	±1,0	+0,8 —1,5	+2 —3
Наборные	±0,25	±0,25	±0,05	+0,3 —0,1	+2 —3

Одним из важнейших требований к механической обработке диафрагм является обеспечение строгой концентричности наружной и внутренней цилиндрических поверхностей диафрагмы между собой и относительно средней окружности каналов. Эксцентричность средней окружности каналов, проверенная относительно отверстия диафрагмы, не должна превышать 0,5 мм.

Выходные кромки лопаток должны лежать в одной плоскости. Западание отдельных кромок не должно превышать 0,5 мм. Отклонение выходной кромки лопаток от радиального положения (или от заданного по чертежу) допускается на наибольшем диаметре ±0,4 мм, а в осевом направлении — ±0,2 мм.

3. Типовые технологические процессы обработки сварных диафрагм

Сварная диафрагма (см. рис. 177) состоит из следующих основных частей: тела диафрагмы *1*, обода *3*, лопаток *2* и бандажных лент — внутренней *5* и наружной *4*.

Процесс обработки сварной диафрагмы состоит из четырех основных этапов:

1) обработка деталей под сварку;

2) сборка бандажных лент с лопатками и сварка их между собой (изготовление решеток);

3) сборка под сварку деталей диафрагмы (тела, обода, решеток), сварка диафрагмы и термическая обработка;

4) механическая обработка после сварки.

Тело и обод диафрагмы поступают на сварку в виде двух половин, обработанных по рис. 179. На этом же рисунке по-

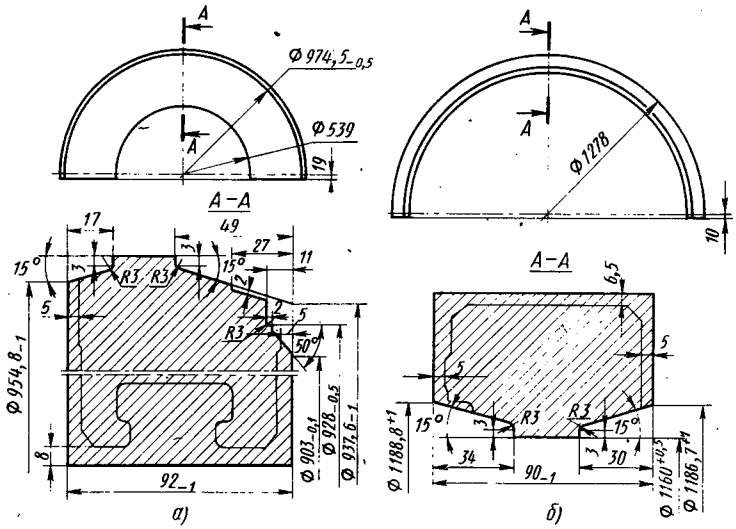


Рис. 179. Обработка под сварку:
а — тела диафрагмы; *б* — обода диафрагмы

казаны припуски, оставленные для дальнейшей обработки после сварки.

Наиболее ответственной и сложной операцией в изготовлении направляющего аппарата является пробивка фасонных отверстий в бандажах под сборку с направляющими лопатками (рис. 180, *а*).

Профиль фасонного отверстия в бандажах должен соответствовать профилю лопатки с круговым зазором 0,2 мм. Выполняются эти отверстия с помощью вырубного штампа (рис. 181). Так как прорубка отверстий осуществляется в прямой ленте (до загибки ее по радиусу), а размеры профиля, указанные выше, даны для уже согнутых бандажей, то в профиль пуансона должны быть внесены соответствующие поправки, определение которых является наиболее сложным моментом в изготовлении штампа. Осуществляется это опытным путем в следующем

порядке. Берут образец бандажа длиной в один-два шага, предварительно согнутый по радиусу, указанному в чертеже бандажа. В этом образце на электроимпульсном станке или слесарным путем выполняют отверстие требуемого размера, подгоняя его по лопатке. Затем образец бандажа выпрямляют и по полученному в нем после выпрямления профилю окна для лопатки изготовляют пуансон.

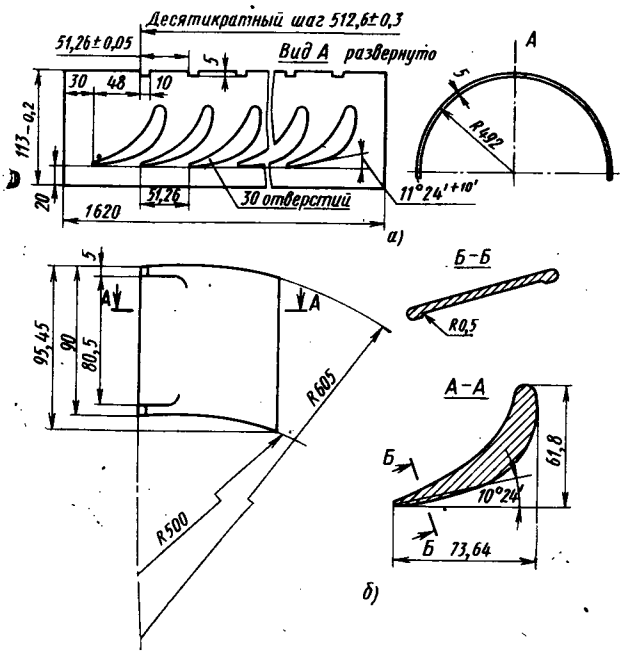


Рис. 180. Бандаж цилиндрической формы рабочего аппарата для сварной диафрагмы (*а*) и направляющая лопатка диафрагмы (*б*)

Устройство штампа должно предусматривать возможность корректировки шага расположения окон для лопаток с учетом поправок на усадку бандажей в процессе сварки. Для этого в конструкции штампа предусмотрен второй пуансон и подвижный фиксатор.

Работа штампа состоит в следующем. На матрицу *8* между направляющими планками *9* и *10* и прижимом-сбрасывателем *7* устанавливают заготовку бандажной ленты и производят в нем пробивку отверстия для лопатки.

Штамп имеет два пуансона. Пуансон *1* является основным. Он осуществляет пробивку фасонного окна для лопатки. Кроме того, в штампе имеется дополнительный пуансон, который пробивает в бандаже паз размером 10 мм, необходимый для фиксирования заготовки под пробивку следующего окна. Пуансон *1*,

закрепленный в пуансонодержателе *2*, имеет непрерывное направление в процессе рабочего хода. В верхней части пуансон направляется разрезной втулкой *3*, расчеканенной во втулко-

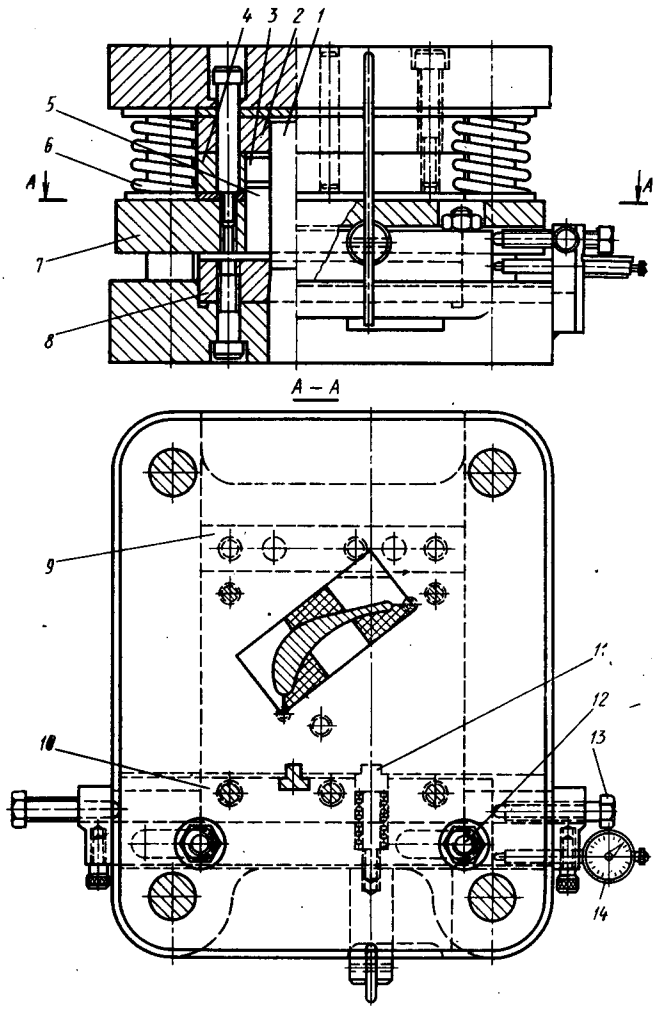


Рис. 181. Штамп для пробивки фасонных отверстий в бандажах сварных диафрагм

держателе *4*, а в нижней части — втулкой *5*, прикрепленной винтами к сбрасывателю *7*. Прижим материала к матрице осуществляется сильными пружинами *6*. При такой конструкции продольный изгиб пуансона исключается, что обеспечивает необходимые условия для точной пробивки толстых листов.

Настройка штампа на заданный шаг размещения профильных отверстий осуществляется посредством перемещения направляющей планки *10* (вместе с которой перемещается и фиксатор *11*) при ослабленных болтах *12*, путем вращения регулировочных винтов *13*. Индикатор *14* указывает величину перемещения.

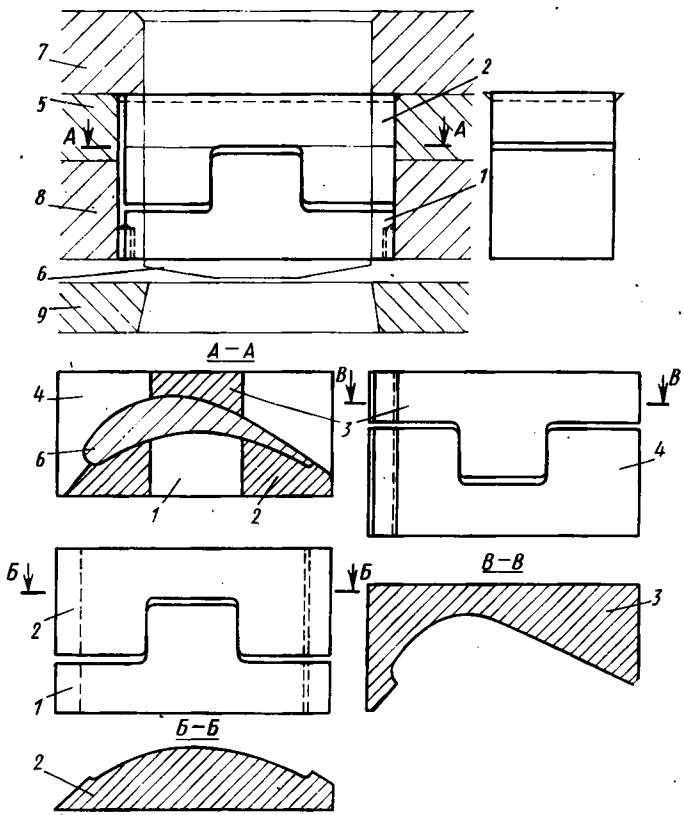


Рис. 182. Направляющая втулка пуансона для пробивки фасонных отверстий в бандажах диафрагм

Первоначально профильные отверстия пробивают в заготовке бандажей, изготовленных из дешевой листовой стали марки Ст3, и определяют накопленную ошибку десятикратного шага (допуск ±0,3 мм). В случае необходимости производят соответствующую корректировку настройки перемещением планки *10*. После достижения положительных результатов приступают к пробивке отверстий в штатных бандажах.

Пробивку профильных окон в бандажах производят на гидравлических прессах, что диктуется необходимостью регулирования скорости пробивки. Пробивка в данном случае осуществляется в лентах толщиной 6—7 мм при сравнительно тонком (в районе выходной кромки) пуансоне (около 4 мм). При большой скорости движения пуансона, что обычно имеет место на эксцентриковом прессе, пуансон часто ломается, хотя и изготовляют его из весьма прочной быстрорежущей стали Р18.

Повышения стойкости пуансона достигают за счет особой конструкции крепления пуансона с направлением его в специальных втулках (рис. 182), а также за счет сильного прижатия бандажной ленты вокруг пробиваемого отверстия.

Направляющая втулка состоит из верхней части, разрезанной на две половины *2* и *3*, которые плотно вставлены и зачеканены во втулкодержателе *5*. Пуансон *6*, плотно укрепленный в пуансонодержателе *7*, находится в этой втулке и перемещается вместе с ней. Нижняя часть втулки, состоящая из двух половин *1* и *4*, установлена и укреплена в сбрасывателе *8* и служит для направления пуансона во время его перемещения. Так как нижняя втулка *1* вместе со сбрасывателем *8* с очень большой силой прижимает бандаж к матрице *9*, то при пробивке окна происходит практически чистый срез, а не выдавливание материала. Это и облегчает условия работы пуансона.

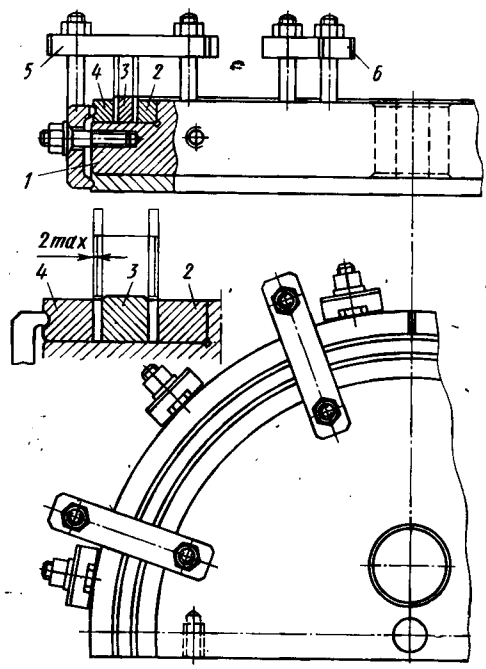


Рис. 183. Приспособление для сборки бандажей с лопатками под сварку

Сборку под сварку бандажей с лопатками производят в специальном приспособлении (рис. 183). Приспособление имеет плиту *1*, в заточке которой находятся три сменных полукольца *2*, *3* и *4*, образующие выточки для установки бандажей. Планки *5* и *6* служат для крепления в приспособлении бандажей, которые устанавливают ребрами паровыпуска вниз. Затем, после прижатия бандажей к плите *1*, в отверстия бандажей заводят лопатки, проверяя радиальное расположение их по

выходным кромкам. Одновременно регулируют западание лопаток в бандажах, которое не должно быть более 2 мм с каждой стороны.

В собранном направляющем аппарате (решетке сопел), не снимая его с приспособления, производят прихватку лопаток к бандажам электросваркой. Затем снимают решетку с приспособления и передают ее на сварку.

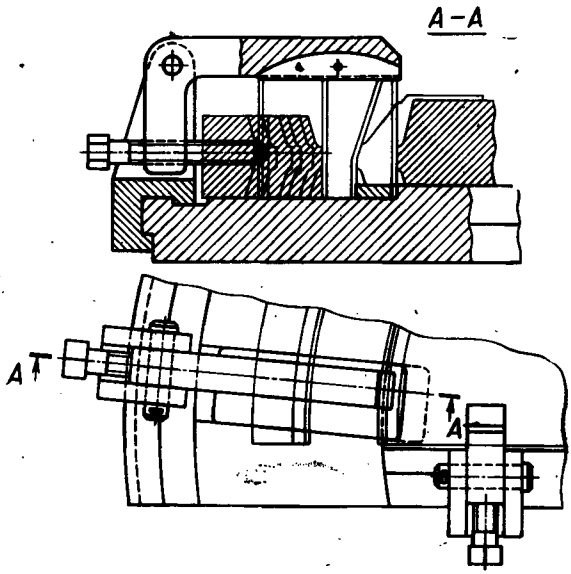


Рис. 184. Приспособление для сборки диафрагмы под сварку

Сварку ведут с предварительным подогревом в печи до температуры 300—400° С. В процессе сварки каждая лопатка обваривается по всему контуру профиля окна.

После сварки незамедлительно нагревают рабочий аппарат в печи до температуры 670—690° С. Нагрев до этой температуры производят постепенно в течение часа, с последующей выдержкой при заданной температуре не менее 30 мин. После термической обработки рабочий аппарат (решетку сопел) для медленного и равномерного охлаждения упаковывают горячим асбестовым полотном. После охлаждения аппарата до температуры 180—150° С его распаковывают.

Сборку решетки сопел с телом и ободом диафрагмы под сварку производят в приспособлении (рис. 184), которое состоит из плиты и зажимных устройств. Решетку сопел устанавливают в приспособление паровыпускной стороной вверх и к ней подводят тело и обод диафрагмы. Собранную таким образом диафрагму равномерно закрепляют прижимами к плите приспо-

собления и соединяют электросваркой. Сварку ведут прерывистым швом длиной 50—60 мм последовательно со стороны паровпуска и паровыпуска, не снимая диафрагмы с приспособления, для чего в плите приспособления предусмотрены окна соответствующих размеров. Это приспособление групповое; оно пригодно для сварки диафрагм нескольких типоразмеров, что обеспечивается соответствующей настройкой приспособления.

Предварительно сваренную прерывистым швом диафрагму освобождают из приспособления и подготовляют под окончательную сварку. Для этого между бандажами с двух сторон диафрагмы приваривают защитные кольца 7 (рис. 185), которые предохраняют выступающие части бандажей от деформации под действием усадочных сил P_1 — P_4. Сварку диафрагм ведут с подогревом до температуры 350—400° С.

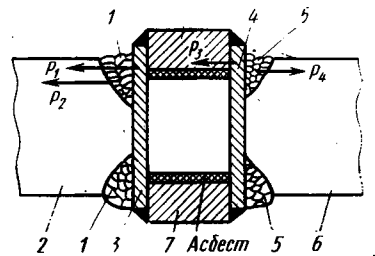


Рис. 185. Схема распределения усадочных сил (напряжений) при сварке диафрагм:

1 — основные швы, соединяющие тело диафрагмы с рабочим аппаратом; 2 — диафрагма; 3 — внутренний бандаж; 4 — наружный бандаж; 5 — сварной шов, соединяющий обод диафрагмы с рабочим аппаратом; 6 — тело диафрагмы; 7 — защитное кольцо; P_1, P_2, P_3 и P_4 — направления усадочных сил

Механическая обработка сварных диафрагм осуществляется в соответствии с групповым технологическим процессом, состоящим из следующих основных операций, выполняемых в указанной ниже последовательности.

1. Карусельная (токарная): вырезка (раздельно в каждой половине диафрагмы) технологических защитных колец на карусельном станке.

2. Контрольная (после сварки): измерение внутреннего диаметра решетки, высоты и ширины горла каналов; проверка суммарного проходного сечения.

3. Разметочная: разметка под обработку торцовых поверхностей и плоскостей разъема половин диафрагмы с базированием от паровыходных кромок лопаток и внутреннего диаметра каналов.

4. Фрезерная: фрезерование по разметке выступающих концов стыковых лопаток у разъема и плоскости разъема у верхней и нижней половин с припуском 2 мм от разметочной риски.

5. Карусельная: точение торцовой поверхности со стороны паровыхода (основной базирующей поверхности) с припуском 2 мм и внутреннего диаметра (центрального отверстия для прохода вала) с припуском 5 мм на диаметр.

6. Разметочная: разметка под окончательную обработку плоскостей разъема верхней и нижней половин диафрагмы с базированием разъема от выходных кромок стыковых лопаток

(рис. 186); разметка должна обеспечить удовлетворительное сопряжение стыковых частей лопаток; допускаемое смещение стыка профиля лопаток в местах *А* — не более 1 мм.

7. Фрезерная: окончательное фрезерование плоскостей разъема обеих половин диафрагмы.

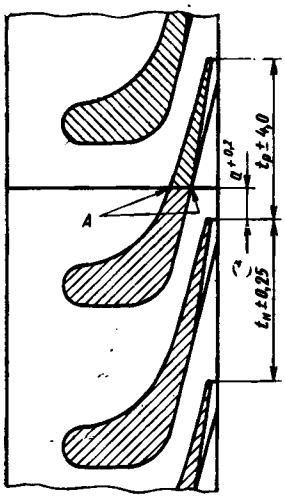


Рис. 186. Схема сопряжения верхней и нижней половин диафрагмы

8. Разметочная: разметка под фрезерование продольных и поперечного шпоночных пазов на разъеме (см. рис. 177).

9. Фрезерная: фрезерование продольных и поперечного шпоночных пазов на плоскостях разъема двух половин диафрагмы.

10. Слесарная: припиловка и пришабривание плоскостей разъема с пригонкой, установкой и закреплением двух продольных и одной поперечной шпонок. Плотность прилегания плоскостей по разъему проверяется по краске и щупу (щуп 0,05 мм не должен проходить в зазор). В местах *А* (рис. 186) образовавшиеся ступеньки на профиле должны быть плавно опилены.

11. Карусельная: окончательное точение по чертежу с проверкой установки по выходным кромкам лопаток, внутреннему диаметру сопел и плотности прилегания обеих половин диафрагмы по разъему (щуп 0,05 мм не должен проходить в зазор).

12. Разметочная: разметка под сверлильную и фрезерную обработку всех отверстий, площадок под подвески и паза для центрирующей шпонки в нижней половине.

13. Сверлильно-фрезерная (группа сверлильных и фрезерных операций): окончательная (по чертежу) обработка всех отверстий, площадок, пазов.

14. Слесарная: испытание диафрагмы на прогиб в присутствии контролера ОТК по инструкции.

15. Слесарная: окончательное опиливание фасок, зачистка разъемов, нарезание мелких резьб, не выполненных при механической обработке.

16. Слесарная: наборка уплотнительных усиков в козырьки.

17. Карусельная: точение уплотнительных усиков в козырьках.

18. Слесарная: пригонка, наборка и закрепление уплотнений центрального отверстия; подготовка диафрагмы под контроль ОТК.

19. Контрольная: окончательный контроль диафрагмы в соответствии с требованиями чертежа.

4. Обработка литых диафрагм

Перед отправкой в литейный цех концы лопаток, заливаемые в чугун, облуживают, что необходимо для улучшения адгезии чугуна с материалом лопаток.

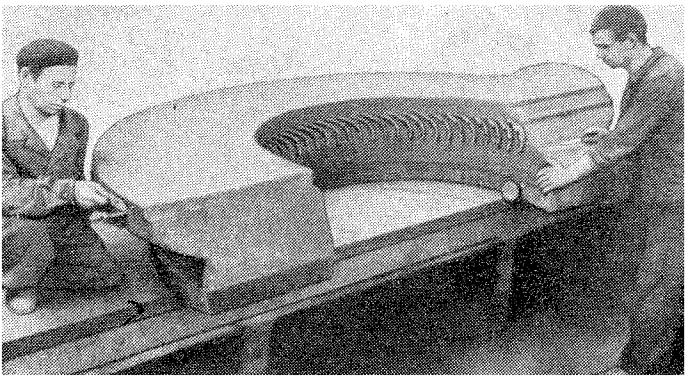


Рис. 187. Стержень с лопатками к литейной форме под заливку диафрагмы

Процесс литья диафрагмы начинается с подготовки литейной формы и стержня с лопатками (рис. 187). Как видно из рисунка, лопатки заделаны в формовочную землю, из которой выступают только концы лопаток, подлежащие заливке. В форме диафрагмы предусмотрено место для установки в нее подготовленного стержня вместе с чугунным подкладным кольцом, который хорошо виден на рисунке. Изготовление стержня производится в деревянном или стальном разборном стержневом ящике, имеющем гнезда для установки лопаток. После сборки с лопатками и забивки каналов между лопатками землей стержневой ящик разбирается. Оставшийся на чугунном полукольце стержень подвергается соответствующему исправлению от повреждений и сушке.

Остывание формы после заливки продолжается от 8 до 20 ч. Затем диафрагма вынимается из опоки, подвергается обрубке, очистке и термической обработке.

Термическая обработка (отжиг) производится 2 раза: первый раз непосредственно после окончания процесса литья, второй — после предварительной механической обработки отливки.

Цель отжига — снятие внутренних литейных напряжений.

В процессе проверки качества отливки контролируются размеры узкого сечения сопловых каналов, шаг между лопатка-

ми, а также прочность соединения лопаток с телом диафрагмы путем их обстукивания; при этом лопатки не должны дребезжать.

Кроме того, производится наружный осмотр качества литья с целью определения внешних дефектов.

Указанный контроль не может дать полного представления о качестве отливки и имеет лишь значение как предварительная проверка.

Действительная годность отливки определяется в процессе последующей механической обработки.

Технические требования к отливкам состоят в основном в следующем. Металл отливки должен быть однородным, серого цвета, мелкозернистым, без пузырей, раковин, трещин и других внешних дефектов. Особое внимание уделяется состоянию поверхностей сопловых каналов, которые должны быть гладкими и в местах соединения лопаток с чугуном не иметь глубоких менисков.

Для надежного сопротивления лопаток прогибу необходимо обеспечить высокую прочность их соединения с ободом и телом диафрагмы.

Размеры отливки в местах, подлежащих обработке, должны иметь припуски, указанные в чертежах заготовок. До передачи на дальнейшую обработку в механический цех отливки должны быть очищены от формовочной земли, обрублены и термически обработаны.

Обнаруженные в процессе механической обработки литейные дефекты (рыхлоты, раковины, трещины) могут завариваться по технологии, утвержденной главным металлургом и согласованной с отделом главного конструктора.

5. Типовой технологический процесс механической обработки литых диафрагм

Типовой технологический процесс механической обработки литых диафрагм (см. рис. 175) состоит из следующих последовательно выполняемых операций.

1. Общая проверка двух частей диафрагмы и их разметка для предварительной обработки плоскостей разъема и одного базового торца со стороны паровыпуска.

2. Предварительная обработка торца обода (отдельно каждой половины диафрагмы) со стороны выхода пара для получения исходной опорной базы для обработки плоскостей разъема и последующей обдирки других поверхностей.

3. Предварительная обработка плоскостей разъема.

4. Предварительное точение (обдирка), со стороны входа пара, двух частей диафрагмы в сборе.

5. Предварительное их точение с другой стороны, также в сборе.

6. Зачистка и исправление дефектов литья.

7. Термическая обработка для снятия внутренних напряжений.

8. Разметка для окончательной обработки плоскостей разъема.

9. Точение торцов обода со стороны выхода пара отдельно в каждой половине.

10. Окончательная обработка плоскостей разъема.

11. Разметка на плоскостях горизонтального разъема пазов для шпонок и отверстий для установочных штифтов и рымов, в зависимости от конструкции диафрагмы.

12. Фрезерование пазов, сверление отверстий и нарезание резьб на плоскостях разъема.

13. Слесарная обработка плоскостей разъема.

14. Окончательное точение диафрагмы.

15. Разметка для сверления отверстий под центрирующие штифты и фрезерования пазов и гнезд, служащих для установки и крепления диафрагмы в корпусе турбины.

16. Сверление и фрезерование указанных отверстий и пазов.

17. Обрубка и опиливание сопловых каналов и зачистка поверхностей направляющих лопаток.

18. Испытание диафрагмы на прогиб.

19. Пригонка и установка лабиринтовых уплотнительных сегментов в пазы диафрагмы. Эта операция может производиться и до испытания диафрагмы на прогиб.

В соответствии с приведенной здесь типовой технологией механическую обработку литых диафрагм разделяют на три основных этапа. В первый этап входит предварительная механическая обработка, имеющая целью снять бо́льшую часть припуска для вскрытия дефектов литья, исправить или выбраковать деталь и подготовить ее к термической обработке. Второй этап включает в себя исправление дефектов литья и последующую термическую обработку для снятия внутренних напряжений. Третий этап состоит из окончательных механической и слесарной обработок.

Окончательное точение собранных половин литых диафрагм начинают со стороны выхода пара. Установку и закрепление диафрагмы производят в кулаках планшайбы карусельного станка.

Для проверки установки в радиальном направлении служит окружность, нанесенная разметкой. Установку в осевом направлении проверяют по проточенному торцу обода со стороны выхода пара и одновременно контролируют по выходным кромкам лопаток.

Исходной измерительной базой в осевом направлении служит плоскость *ж* (см. рис. 175), проходящая через выходные кромки лопаток. Однако эта плоскость неудобна для непосредственных измерений, и поэтому за измерительную базу принимают поверхность *з*, которую точат, выдерживая размер от паровыходных кромок лопаток.

Ниже приводится последовательность переходов при окончательном точении диафрагмы.

1. Точение поверхности *и*, исключая часть с размером 24,5 мм, зажатую в кулаках; диаметр $2085_{-0,2}$ мм измеряют раздвижной скобой.

2. Точение базового торца *з* с выдерживанием размера 10 мм от наиболее выступающих кромок лопаток. Для удобства работы их метят при разметке. Измерение обычно выполняют микрометрическим глубиномером.

3. Точение торца *д* до размера 6 мм от наиболее выступающих кромок лопаток *ж*.

4. Точение торца *в*. Контроль размера $35,5^{+0,1}$ мм производят предельной пластиной от линейки, установленной на торец *з*.

5. Точение галтели $R = 10$ мм по шаблону с выдерживанием диаметра 992 мм.

6. Точение конусной поверхности *е* с выдерживанием диаметра $1372^{+0,5}$ мм и угла 35°. Конусная поверхность обтачивается широким резцом с наклоном режущей грани на необходимый угол и радиусом $R = 10$ мм. Для измерения принимают шаблон на конус и раздвижную скобу.

7. Точение конусной поверхности *г* до сопряжения с ранее проточенными двумя галтелями радиусом $R = 10$ мм.

8. Растачивание отверстия *б*. Для измерения применяют раздвижной микрометрический штихмас.

В последующие переходы входит точение паза *а* под сегменты лабиринтового уплотнения. Обработка этого паза производится аналогично обработке пазов в дисках турбин.

Не меняя установку диафрагмы, делают заточку на противоположном торце *к* (диаметры 912—992 мм) для контроля индикатором положения диафрагмы при следующей (второй) установке.

Точение диафрагмы при второй установке начинают с торца *л*, выдерживая размер 109,5 мм, затем торца *к* (120 мм) и галтели радиусом $R = 8$ мм с применением фасонного резца и шаблона. Уступ торца контролируют глубиномером. При точении торца *м* измерение производят от поверхности *л*, исходя из разности размеров $113,5 - 109,5 = 4$ мм, пользуясь при этом мерными плитками и контрольной линейкой, устанавливаемой на торец *м*. После проточки торца *м* приступают к точению галтелей и конических поверхностей, которые обрабатывают аналогично обработке таких же поверхностей на первой (на рисунке — левой) стороне данной диафрагмы.

Среди ручных слесарных операций обработки диафрагм наиболее ответственной является рубка и опиливание стенок канала, образованных литой поверхностью, для обеспечения чертежной высоты каналов и соответствующей чистоты поверхности.

Высота и правильное расположение каналов со стороны выхода пара обеспечиваются снятием припуска, оставляемого в отливке в пределах горла канала (см. рис. 176). Для выполнения этой ответственной операции диафрагму сначала размечают. Из центра ранее нанесенной средней окружности лопаток (центр этот должен совпадать с осью диафрагмы) проводят риски двух окружностей указанными в чертежах радиусами: одну — на теле диафрагмы у начала лопаток и вторую — на ободе у конца лопаток. Эти риски могут быть сделаны резцом при чистовом точении.

Для разрубки применяют специальные зубила, имеющие специальную форму и профиль, а также напильники, которым иногда, также в зависимости от профиля канала, придают кривизну путем их изгиба в горячем состоянии, с последующей закалкой.

Указанные работы являются ответственными и трудоемкими, так как выполняются в весьма трудных условиях. Для выполнения их требуется опытный и квалифицированный исполнитель

6. Особенности обработки диафрагм с косыми разъемами

Назначение косых разъемов — избежать перерезывания или свисания в разъем концевых лопаток каждой половины диафрагмы. Из чертежа диафрагмы (см. рис. 176) видно, что при выполнении этого условия плоскость разъема не может быть общей для левой и правой частей стыка (штриховая линия).

Исходной базой для разметки и обработки правой и левой частей разъема служит радиальная плоскость, проходящая через ось диафрагмы. След этой плоскости показан линией II—II.

Основные требования к обработке косых разъемов следующие:

а) прилегание по разъему должно быть паронепроницаемым;

б) шаги лопаток у разъемов должны быть выполнены строго по чертежу;

в) средняя окружность каналов не должна иметь овальности.

Последние два условия взаимосвязаны и часто практически трудно выполнимы, так как зависят от точности установки лопаточного аппарата при формовке диафрагмы в литейном цехе. При разметке диафрагмы под обработку разъемов стремятся получить правильную окружность за счет некоторого искажения шагов у разъема.

Обработка косых разъемов производится по разметке на продольно строгальных станках с наклоном суппортов или на специальных фрезерных станках с поворотными шпиндельными бабками.

Кромки лопаток диафрагмы со стороны выхода пара расположены не перпендикулярно оси, как это бывает в большинстве других конструкций диафрагм, а наклонены на некоторый угол α. Установка под разметку в данном случае выполняется с ориентировкой на точки кромок, расположенные на окружностях диаметром D_1 и D_2.

Предварительное точение каждой половины диафрагмы в отдельности производят на токарно-карусельных станках. Сначала точат торец *1*, контролируя размер *К*. Затем точат поверхность *2*, обеспечивая размер *Л*. Поверхность *3* точат со второй установки детали с выдерживанием размера *В*. Размеры *К*, *Л* и *В* при предварительной обработке выдерживают, оставляя припуск по 3—4 мм на сторону.

Разметку плоскостей разъема для предварительной обработки ведут в следующем порядке:

а) устанавливают каждую половину диафрагмы на разметочную плиту стороной выхода пара вверх;

б) расцентровывают каждую половину диафрагмы, исходя из среднего диаметра каналов, и из найденного центра проводят окружности диаметрами D_1 и D_2;

в) рассчитав величину b от кромок лопаток, проходящих по окружности D_1, проводят риску *I—I* с двух сторон каждой половины диафрагмы;

г) на окружностях D_1 и D_2 откладывают размеры $г$, $е$ и, аналогично, $г_1$, $е_1$ от паровыходных кромок лопаток до линии разъема и размеры $д$ и $д_1$ — от линии разъема до радиальной базовой плоскости, проходящей через ось диафрагмы по разъему цилиндра;

д) по найденным четырем точкам, по размерам $д$ и $д_1$ на окружностях D_1 и D_2 выносят на наружную цилиндрическую поверхность обода с диаметром D с двух сторон каждой половины диафрагмы линию *II—II*, лежащую на радиальной базовой плоскости, и проверяют ее совпадение с ранее найденной осью диафрагмы;

е) через полученные точки пересечения линий *I—I* и *II—II* проводят риски под углом β на наружных цилиндрических поверхностях обода двух половин диафрагм; эти риски служат для предварительной обработки плоскостей разъема с припуском 5—10 мм.

Размеченные таким способом половины диафрагм поступают на обработку плоскостей разъема фрезерованием или строганием.

Для строгания на столе станка одновременно устанавливают обе половины диафрагмы, располагая их по краям стола,

с ориентировкой от края стола по размеру b, который определяется по местным условиям (рис. 188), до рисок $I—II$ (см. рис. 176). Обработка ведется двумя суппортами, повернутыми на определенный угол в противоположные стороны. Строгание плоскостей разъема производится с двух установок. При этом

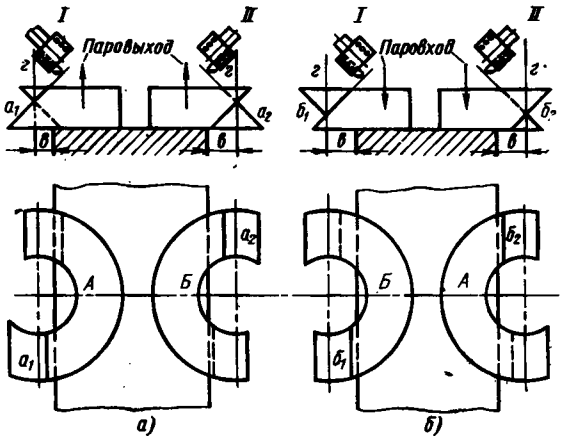


Рис. 188. Схема установки диафрагмы и настройки резцов для обработки косых плоскостей разъема на строгальном станке (положение половин диафрагмы показано условно)

каждый суппорт строгает в обеих половинах стыкующиеся между собой плоскости. Это видно из рассмотрения положений половин A и $Б$ (рис. 188, $а$) при первой и второй (рис. 188, $б$) установках и стыкующихся поверхностей a_1 и $б_1$, a_2 и $б_2$.

Способ установки половин диафрагмы на фрезерном станке и настройка шпиндельных бабок для фрезерования наклонных плоскостей их разъемов состоит в следующем.

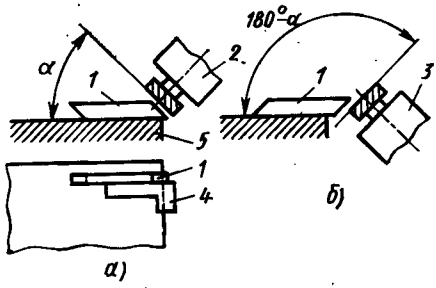


Рис. 189. Схема настройки фрезерных суппортов для обработки косых плоскостей разъема диафрагмы

Сначала по шаблону *1* (рис. 189), лежащему на столе станка *5*, устанавливают при помощи индикаторов необходимые углы поворота шпиндельных бабок *2* и *3*. Для обеспечения правильного положения шаблона относительно плоскости стола применяют специальный угольник *4*. Зафиксировав настройку шпинделей, устанавливают первую половину диафрагмы стороной паровыхода вверх. За

проверочные базы принимают плоскость стола и риски *II—II* (см. рис. 176). Затем фрезеруют деталь одновременно двумя фрезами (рис. 189), оставляя припуск для чистовой обработки 5—10 мм.

С этой же установки шпиндельных бабок производят обработку второй половины диафрагмы. Однако для получения более точного прилегания стыкующихся плоскостей, при установке второй половины диафрагмы, паровыходные кромки лопаток должны быть направлены в противоположную сторону, т. е. вниз. В этом случае каждая фреза будет обрабатывать в обеих половинах диафрагм стыкующиеся между собой плоскости разъема, и различие в углах наклона шпинделей и неточность их установки на точность сопряжения двух половин диафрагмы влияния иметь не будут.

7. Испытание диафрагм на прогиб

Для определения прочности и жесткости каждая диафрагма после полной механической обработки подвергается испытанию на прогиб (рис. 190) при определенной нагрузке, после чего решается вопрос о ее пригодности к использованию в турбине.

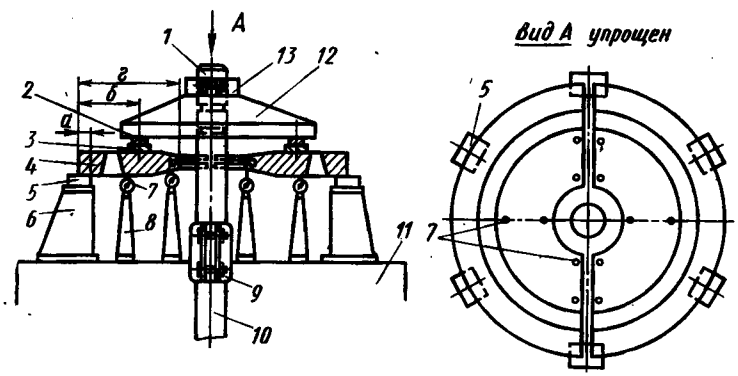


Рис. 190. Схема испытания диафрагмы на прогиб на гидравлическом прессе

Испытание диафрагм на прогиб производят на специальном вертикальном гидравлическом прессе или при помощи особых гидравлических подушек. Испытанию подвергаются все диафрагмы при двукратной пробе на 100%, а также двукратной на 150%-ную максимальную паровую нагрузку Q на площадь диафрагмы. В особых случаях диафрагмы испытывают на 200%-ную максимальную нагрузку. Одновременно проводится испытание двух половин без направляющих шпонок, предохраняющих половины диафрагм от смещения в осевом направлении. Испытание одной половины без другой, парной с нею, не разрешается.

Для проведения испытаний диафрагмы требуется наличие следующих данных: 1) расчетной нагрузки; 2) величины нагрузки при 100 и 150% от нагрузки пара; 3) величины радиуса приложения сосредоточенной нагрузки на диафрагму; 4) радиуса расположения середины опор для установки диафрагмы на прессе; 5) расчетных величин прогибов при 100 и 150%-ных нагрузках.

При испытании диафрагму *4* устанавливают на стойках *6*, расположенных на столе пресса *11*, по радиусу, равному среднему радиусу обода диафрагмы.

Между ободом и стойками прокладывают опоры *5*. Для установки диафрагм диаметром до 1500 мм используют четыре стойки, свыше 1500 мм — шесть стоек. По всей окружности приложения нагрузки на размер *б* устанавливают стальные отшлифованные одинаковой высоты (20—30 мм) прокладки *2*, расположенные на расстоянии 30—40 мм одна от другой. Для равномерного распределения нагрузки, передаваемой от пресса через детали *10*, *9*, *1*, *12* и *13*, между прокладками *2* и испытываемой диафрагмой помещают прокладки *3* из твердой резины, толщина которой должна быть равной толщине прокладок *2*. Накладывание прокладок *2* на конические или переходные поверхности тела диафрагмы не допускается. Нормально прокладки должны располагаться по окружности и отстоять от наружной окружности обода диафрагмы на расстоянии *б* с учетом следующих соотношений: $б - a = \frac{г - a}{3}$, откуда $б = \frac{г - a}{3} + a$.

Практически прокладки *3* и *2* располагают по несколько бо́льшему или меньшему радиусу из-за наличия на теле диафрагмы конических или переходных поверхностей. Естественно, что в этих случаях величина *б* будет отличаться от расчетной и станет, например, равной *l*. В соответствии с этим необходимая для испытания нагрузка *Q*, которую предусматривалось приложить на определенном диаметре, должна быть пересчитана из условия неизменности кольцевого момента: $Q_1 = \frac{(г - a) : 3}{l - a} Q$ — для испытания при 100%-ной нагрузке; $Q_2 = 1{,}5 \frac{(г - a) : 3}{l - a} Q$ — для испытания при 150%-ной нагрузке.

После установки диафрагмы на столе пресса, перпендикулярно к поверхности диафрагмы устанавливают двенадцать индикаторов *7*, укрепленных в универсальных штативах *8*. Шесть из них располагают у отверстия диафрагмы и остальные шесть по меньшему радиусу лопаток. Показания всех индикаторов настраивают на нуль с натягом приблизительно 0,4—0,6 мм. Испытание считается удовлетворительным, если показания индикаторов при заданной нагрузке не изменяются от одного испытания к другому. В противном случае необходимо выяснить причину изменения прогибов, устранить ее и провести

повторные испытания. Если показания индикаторов будут при повторных нагружениях снова различными, то испытание прекращают, и вопрос о необходимости и порядке дальнейшего проведения испытаний передают для решения главному конструктору.

Глава XVII. СЕГМЕНТЫ СОПЕЛ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Сопловые аппараты в паровых турбинах высокого давления с регулирующей ступенью состоят из комплекта сегментов сопел, пар к которым поступает от регулирующих клапанов. Весь сопловый аппарат состоит из четырех сегментов, установленных в свои сопловые коробки, соединенные с соответствующими регулирующими клапанами.

Для турбин, имевших относительно низкие параметры пара, сегменты изготовлялись наборными, т. е. составленными из отдельных лопаток. В турбинах высокого давления, для создания полной герметичности отдельных каналов, заводы стали применять сварные или литые [7] сегменты сопел, однако литые конструкции оказались менее точными, чем фрезерованные, вследствие чего они не получили широкого распространения.

Сварной сегмент сопел одной из сопловых коробок турбины высокого давления (рис. 191) состоит из собственно сегмента *1*, вставок *2* и обода *3*. Детали сегментов, работающие при температуре пара до 500° С, обычно изготовляют из стали марки 1Х13; при более высоких параметрах пара (до 535° С) — из стали 1Х11МФ, а при температурах до 565° С — из стали 15Х12ВМФ. Заготовками для деталей сегмента сопел являются поковки в виде кусков кольца с припусками по 5—8 мм на сторону.

Типовой технологический процесс обработки сегмента (деталь *1*) состоит из следующих операций.

1. Токарная: точение окончательно по чертежу. Поверхности, определяемые диаметрами 910 и 812 мм, точить с точностью по C_3 и A_3, что дает возможность использовать эти поверхности в качестве баз для дальнейшей обработки диаметра.

2 и 3. Разметка и фрезерование поверхностей *Д* и *Е*.

4. Слесарная зачистка после точения и фрезерования.

5. Разметка каналов: начинается с разметки на торцовой плоскости со стороны паровыхода радиальных осевых рисок, расположенных относительно друг друга под углом 8° 18′. Затем, пользуясь накладными шаблонами, ориентируемыми на радиальные риски, размечают контуры каналов, учитывая скос 10 мм и «обнизку» на выходных кромках, в размере 15 мм, на диаметре 948 мм.

6. Фрезерование каналов предварительное, с припуском от разметки по контуру 3 мм и по глубине 2 мм. Выполняется эта операция пальцевой фрезой на вертикально-фрезерном станке при помощи специального приспособления; сегмент при этом устанавливается наклонно с учетом скоса у дна каналов, что обеспечивается клином, помещенным под основание приспособления.

7. Слесарная: опиливание острых кромок и заусенцев после фрезерования каналов.

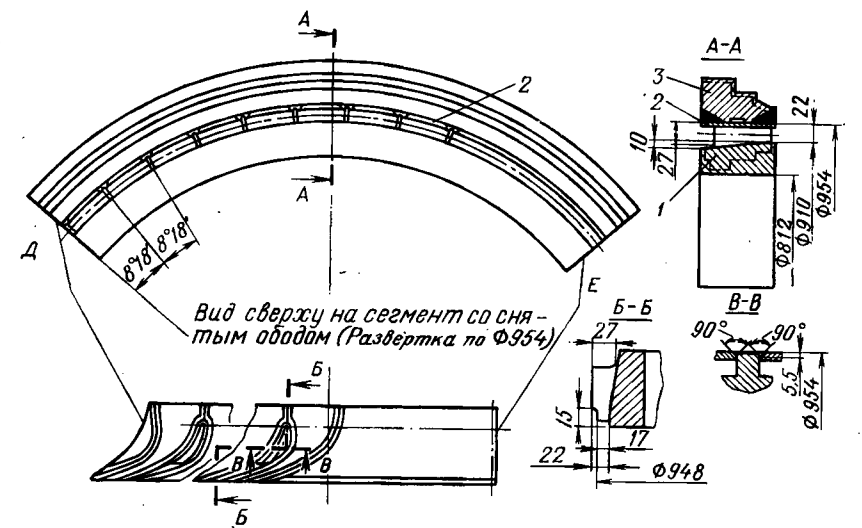


Рис. 191. Сегмент сопел 1-го клапана паровой турбины ВПТ-25-3

8. Фрезерная чистовая: окончательная обработка каналов по контуру и глубине с выдерживанием размеров 17, 22 и 27 мм. Операция выполняется на специально приспособленных станках с механическим копированием или на электрокопировальных станках. Контур каналов контролируется шаблонами. При обработке на станках с механическими копированием на последующую слесарную опиловку оставляются припуски: по контуру до 0,15 мм и по глубине до 0,5 мм. Более точное копирование обеспечивается при использовании электрокопировальных станков, после которых на последующую слесарную зачистку оставляются припуски: по контуру до 0,1 мм, по глубине паза до 0,3 мм.

9. Слесарная: опиливание каналов по шаблону до достижения установленных чертежом размеров и класса чистоты поверхности.

10. Разметка фасок 5,5 × 45° во всех каналах и контура стыковых поверхностей сегмента *Д* и *Е*.

11. Фрезерование «обнизок» на выходных кромках в размер 15 мм до диаметра 948 м и фасок 5,5 × 45° во всех каналах и контуры *Д* и *Е*.

12. Слесарная: пригонка вставок к сопловым каналам и сборка их в приспособлении (рис. 192) под прихватку; освобождение из приспособления после прихватки. Основная задача сборки — обеспечить заданную высоту каналов. Для этой цели в приспособлении предусмотрены дистанционные планки.

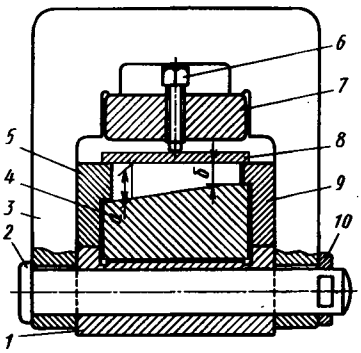


Рис. 192. Схема приспособления для сборки под прихватку электросваркой вставок к сегменту:

1 — корпус приспособления; *2* — штырь скобы; *3* — скоба; *4* — сегмент, собираемый со вставками; *5* — планка дистанционная на размер *а* высоты каналов со стороны парохода; *6* — болт для прижима вставки к сегменту; *7* — траверса; *8* — вставка; *9* — планка дистанционная на размер *б* со стороны паровыхода; *10* — чека

На ТМЗ вставки стали выполнять не отдельными элементами, а в виде цельного бандажа аналогично бандажу сварных диафрагм (см. рис. 180, *а*). Обработку окон ведут на электроимпульсных станках модели 473 графитовым электродом с использованием специального делительного приспособления [13].

13. Сварочная: прихватка электросваркой бандажей или вставок (при выполнении бандажа из отдельных элементов) к сегментам.

14. Сварочная: приварка вставок к сегментам. Сварка выполняется с подогревом до температуры 300—350° С.

15. Термическая обработка: отпуск для снятия внутренних напряжений перед механической обработкой.

16. Токарная: точение после сварки по диаметру 954 мм (рис. 191) заподлицо с ранее обточенной поверхностью.

17. Слесарная: опиловка и пригонка обода под приварку и сборка сегмента с ободом под прихватку обода; снять с приспособления после прихватки.

18. Сварочная: сварка окончательная с подогревом до 300—350° С.

19. Термическая обработка после сварки.

20. Токарная: окончательное обтачивание по чертежу.

Глава XVIII. ДЕТАЛИ УПЛОТНЕНИЙ

Уплотнения разделяются на концевые и промежуточные. Концевые уплотнения предназначены для ограничения протекания пара из турбины наружу в местах выхода вала из цилиндра, при превышении давления пара в цилиндре над атмосферным, а

также предотвращения засоса воздуха в цилиндр, в местах вакуума. Промежуточные уплотнения устанавливают в расточках диафрагм для ограничения перетекания пара из ступени с более высоким давлением в ступень с более низким давлением.

Типовые конструкции уплотнений показаны на рис. 193. Широкое распространение в турбинах получили «елочные» уплотнения (рис. 193, *а*), показанные в сборе на рис. 194. Такие уплотнения, имея меньшую длину, чем уплотнения других типов,

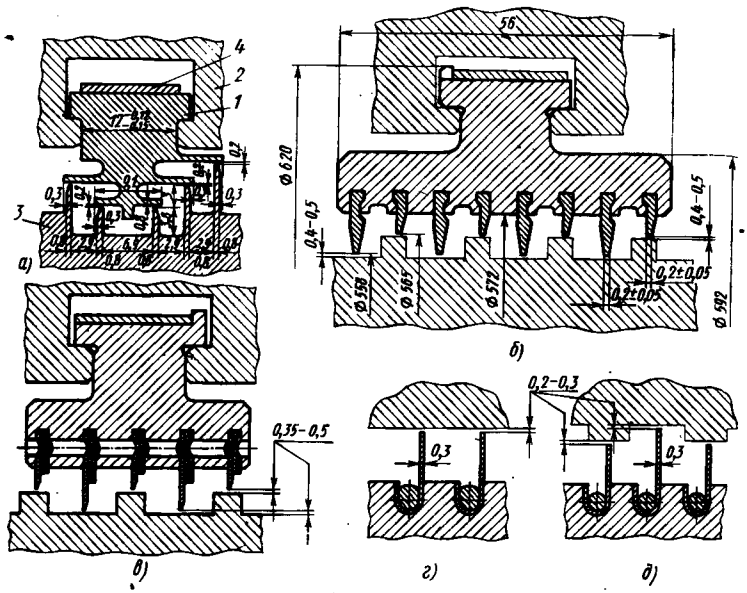


Рис. 193. Типовые конструкции уплотнений:
1 — сегмент; *2* — обойма; *3* — гребенчатая втулка; *4* — пружина

создают эластичную систему, допускающую значительные осевые перемещения *Н* и *К* при весьма малых радиальных зазорах *П*.

Елочные уплотнения состоят из сегментов *1*, вставленных в обойму *2*, и гребенчатой втулки *3*, насаживаемой на вал ротора *5*. Сегменты заводятся в Т-образные кольцевые пазы обойм и прижимаются к выступам обойм плоскими пружинами *4*. Обойма, состоящая из двух половин, устанавливается в корпус уплотнения *6* или в цилиндр выступом по размеру *А*.

Втулка *3* насаживается на вал горячей посадкой с натягом 0,2—0,3 мм и дополнительно стопорится шпонками. Уплотнительные кольца составляются из четырех или шести сегментов в следующих вариантах: из двух сегментов с центральными углами 115° и двух по 65° или из двух сегментов с углами по 65°

и четырех по 57,5°. Это дает экономию металла в результате более целесообразного раскроя колец.

Точность осевой установки обоймы относительно ротора по зазорам *Н* и *К* обеспечивают за счет подрезания (по замерам с места) припусков в местах *а*. Регулирование радиального зазора *П* производят протачиванием гребешков втулки *3* или подшабриванием заплечиков у сегментов в местах *д*.

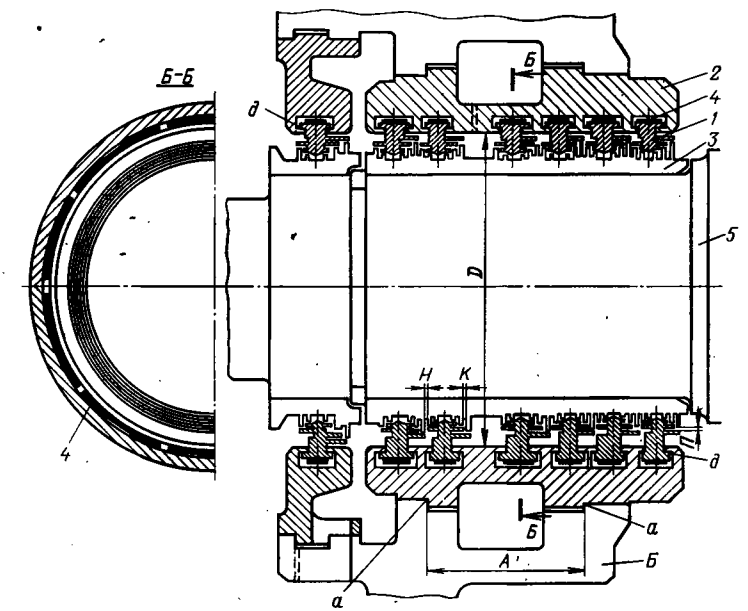


Рис. 194. Лабиринтовое уплотнение елочного типа

Уплотнения с насадными гребенчатыми втулками удовлетворительно работали при температурах пара до 475° С. В высокотемпературных турбинах при такой конструкции наблюдалось ослабление посадки втулок на вал, что вызывало вибрацию ротора, полное разрушение лабиринта и прогиб вала. Поэтому в современных конструкциях концевых и промежуточных уплотнений ВД (см. рис. 193, *б*), а также в переднем и промежуточных уплотнениях НД (см. рис. 193, *в*) выступы выточены непосредственно на валу турбины.

В одновальной турбине 800 МВт ЛМЗ концевые уплотнения роторов ВД и СД, а также внутреннее уплотнение ВД имеют лабиринтовую конструкцию и состоят из усиков толщиной 0,3—0,4 мм, завальцованных в канавки на роторе (см. рис. 193, *д*), и гребенчатых колец, установленных в обоймах статора. Концевые уплотнения роторов НД — прямоточные (см. рис. 193,

г). Такие уплотнения полностью исключают возможность задеваний при относительных смещениях ротора.

В уплотнениях диафрагм всех ступеней турбины применяются кольца с усиками, вставленными в соответствующие пазы диафрагм (см. рис. 193, *в*). В цилиндрах высокого и среднего давления усики вытачиваются заодно с кольцами, а в цилиндрах низкого давления латунные усики зачеканиваются в стальные кольца.

«Елочные» кольца (см. рис. 193, *а*) изготовляются из нержавеющих сталей. Уплотнительные кольца цилиндров высокого давления (см. рис. 193, *б*) изготовляются из стали, а усики для них — из монель-металла. Уплотнительные кольца цилиндров низкого давления (см. рис. 193, *в*) изготовляются из стали Ст3, а наборные усики — из лент монель-металла.

В промежуточных уплотнениях цилиндров низкого давления последних ступеней кольца изготовляются из стали Ст3, а усики — из латуни Л68. Пружины *4* (рис. 194) для применения в области высоких температур изготовляются из стали ХН35ВТ, а для применения в области умеренных и низких температур — из нержавеющих сталей 3Х13 и 4Х13.

Усики ножевых уплотнений для работы при невысоких температурах могут быть изготовлены из нейзильбера и нержавеющих сталей, например 2Х13, а для работы в современных высокотемпературных турбинах — из аустенитных жаростойких сталей, например Х18Н10Т.

Основные технические требования к изготовлению уплотнительных колец следующие: 1) перед окончательной обработкой заготовку необходимо отпустить при температуре 550—600° С; 2) после разрезки кольца каждый сегмент по плоскости разреза должен иметь припуск 0,5 мм на сторону; 3) сегменты должны быть пригнаны шабрением или шлифованием впритык без зазора; 4) концентричность цилиндрических поверхностей следует выдерживать с точностью до 0,04 мм; 5) толщину усиков следует выдерживать с точностью до 0,05 мм; 6) чистота обработки должна соответствовать 5-му классу.

Схема типового технологического процесса изготовления уплотнительных колец елочного типа показана на рис. 195. Заготовкой для колец служит стальная поковка на четыредесять колец с прошитым отверстием, которую обрабатывают предварительно с припуском 3 мм на сторону и подвергают термической обработке для снятия внутренних напряжений. После этого производят окончательную обработку заготовки снаружи и внутри, а затем прорезают елочные усики.

На схеме приведена последовательность обработки елочного кольца для образования усиков. Обработку ведут ступенями. Глубину ступеней определяют по нониусу или по упорам станка. Размеры усиков и заплечиков проверяют предельными калибрами. После окончания обработки одной стороны кольца

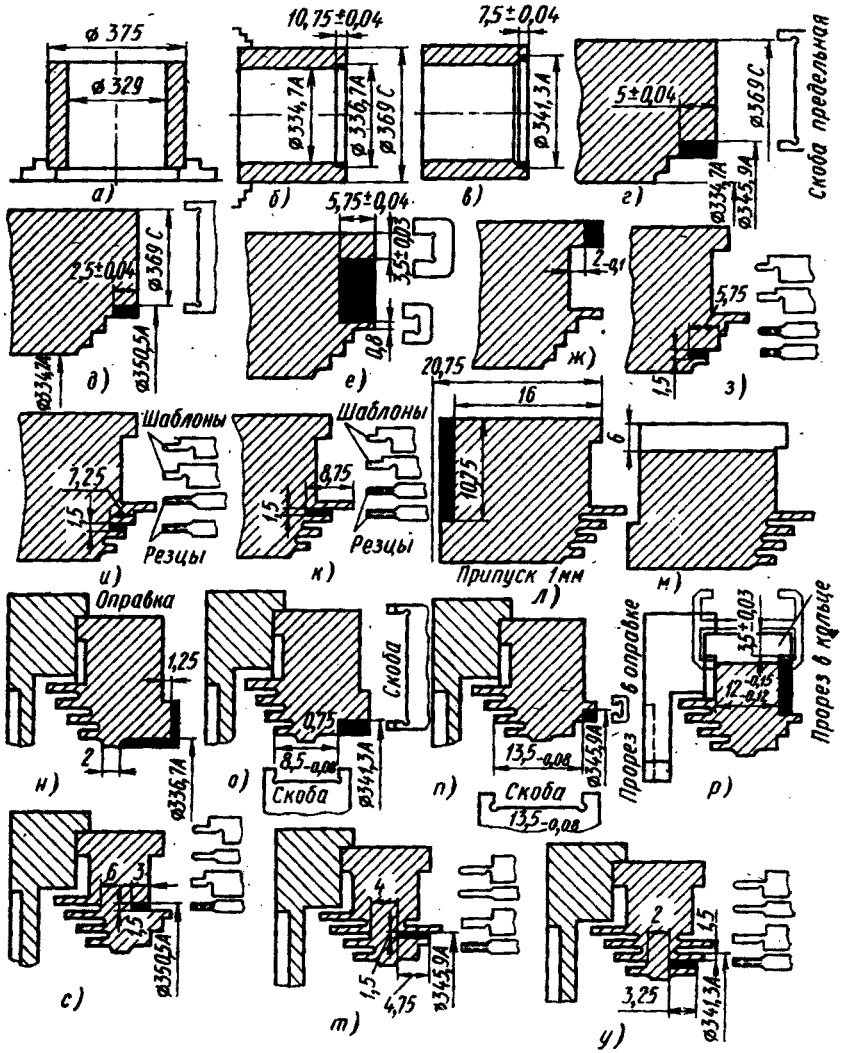


Рис. 195. Схема обработки елочных колец:
а — у — последовательность переходов

производят врезание в материал до 3-го усика (рис. 195, *л*) и затем кольцо отрезают от заготовки. Толщина отрезанного кольца должна быть равна максимальной длине усиков плюс 1 мм припуска.

Далее обрабатывают вторую сторону кольца, перед чем для удобства измерения посадочного размера $12^{-0,12}_{-0,15}$ Т-образного профиля (рис. 195, *р*), целесообразно во всех заготовках

прорезать паз шириной и глубиной 6 мм (рис. 195, *м*). При токарной обработке второй стороны уплотнительных колец возникают большие затруднения в их закреплении. По своей конструкции кольца не являются жесткими и при малейшем пережиме деформируются, что приводит к овальности и другим погрешностям. Для устранения деформаций в процессе обработки колец в качестве приспособлений применяют жесткие оправки с посадочными выемками. Уплотнительные кольца устанавливают в посадочные выемки оправок с напряженной или тугой посадкой 1-го класса точности. Натяг, образующийся при посадке, создает большие силы трения, удерживающие кольцо от проворачивания в процессе точения. Для облегчения выбивки колец из оправки, а также для промера их толщины, на оправке имеются диаметрально противоположные вырезы.

Недостатком крепления колец силой трения является необходимость точения наружного диаметра колес с высокой степенью точности. В противном случае оправку придется перетачивать. Попытка создать приспособления с зажимом колец болтами и планками успеха не имела. Крепление колец болтами нерационально, так как занимает много времени, а выступающие болты и планки весьма неудовлетворительны с точки зрения техники безопасности и мешают в работе.

Цанговые приспособления, которые применялись вместо жестких оправок, оказались очень сложными в изготовлении и ненадежными в работе. Кроме того, их трудно настраивать и выверять при установке. Количество таких приспособлений определяется количеством колец, находящихся в производстве. Вследствие этого требуется изготовлять большое количество сложных и громоздких приспособлений, что, в свою очередь, усложняет организацию и обслуживание производства, приводит к большим непроизводительным затратам рабочего времени.

В крупносерийном производстве для точения колец целесообразно применять мембранные приспособления с быстросменными колодками, которые можно перетачивать на месте по размеру колец. Это упрощает установку и выверку самих приспособлений. Освобождение деталей осуществляется при помощи пневматических устройств, однако в мелкосерийном производстве уплотнительных колец жесткие оправки с креплением в них обрабатываемых колец силой трения оказались самыми надежными и рациональными.

Передовые токари турбиностроительных заводов разработали новую весьма эффективную технологию точения елочных уплотнений последовательными переходами. Раньше глубина прорезки и диаметральные размеры выемок и ступеней определялись по упорам и концевым мерам; на настройку упоров требовалось дополнительное время. Теперь обработку елочных усиков производят методом последовательных переходов. Глубина прорезки выемок и диаметральные размеры ступеней опреде-

ляются при помощи делений лимба на суппорте станка. Радиальные размеры усиков проверяются скобами или жесткими штихмасами, в зависимости от габаритов и профиля колец. Выемки между усиками прорезаются вначале прямыми резцами, а оставшийся 1 мм припуска прорезают закругленным фасонным резцом. Размер $12^{-0,12}_{-0,15}$ (рис. 195, *р*) проверяют специальными скобами или резьбовым микрометром со вставными ножками.

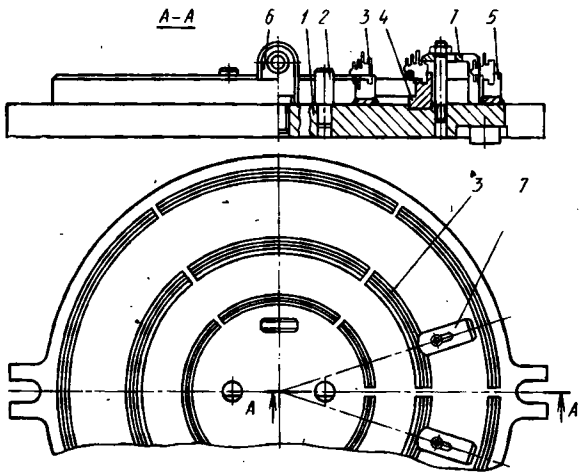


Рис. 196. Приспособление для разрезки колец:
1 — корпус; *2* — установ; *3—5* — установочные кольца; *6* — рым; *7* — прихват

Разрезку колец разных типов на сегменты производят в приспособлении (рис. 196), которое предохраняет елочные выступы от повреждений. Сегменты разрезают с припуском 0,5 мм на сторону.

После разрезки сегментов на отдельные части плоскости их торцов отклоняются от радиальных отклонений, и на их поверхностях остаются глубокие риски от работы фрезы. Так как при наборе сегментов, при установке их в турбину, между торцовыми плоскостями допускается зазор не свыше 0,05 мм, требуется пригонка торцовых плоскостей по шаблону. Их обычно опиливают и шабрят.

Одно из приспособлений для механизации слесарной пригонки сегментов показано на рис. 197. Оно устанавливается на верстаке и состоит из основания *6* с точными направляющими для подвижного стола *8*. Упоры *3* и *4* определяют положение обрабатываемого сегмента *9* относительно шлифовального круга *2*. Упор *4* подвижный, что обеспечивает возмож-

ность перестройки приспособления в зависимости от диаметра шлифуемых сегментов. Для облегчения перемещения по направляющим стол установлен на шариках *5*, уложенных в пазы основания и удерживаемых сепараторами. От попадания пыли направляющие и шарики предохраняются щитками *7*. Шлифовальный круг закрепляется непосредственно на валу электродвигателя *1*. При пригонке слесарь прижимает сегмент руками

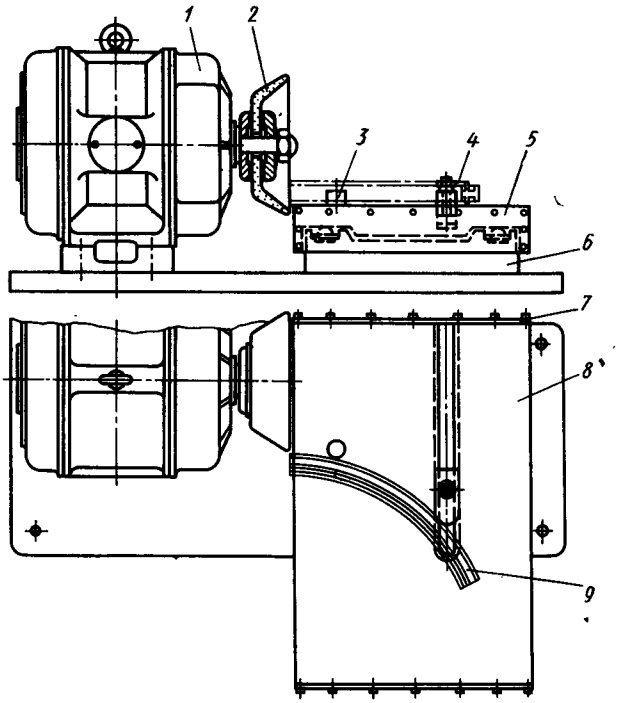


Рис. 197. Приспособление для шлифования торцовых плоскостей сегментов уплотнений

к упорам *3* и *4* и при этом перемещает стол с сегментом относительно шлифовального круга, постепенно подвигая сегмент к кругу на глубину шлифования.

Обработка колец с наборными усиками (см. рис. 193, *б*, *в*) на первых операциях, включая и токарную обработку, идентична обработке колец елочного типа. После точения обработка колец ведется в следующей последовательности: 1) установка и зачеканка усиков; 2) точение усиков в размер после зачеканки; 3) разрезка кольца на сегменты; 4) пригонка торцовых плоскостей по шаблону.

При изготовлении уплотнений ножевого типа усики запрессовывают непосредственно в вал ротора или во втулку, которую

напрессовывают на вал, или в уплотнительные обоймы, устанавливаемые в виде двух половин в корпус турбины. Первые две конструкции более технологичны, так как у них отсутствует плоскость разъема, а заготовки усиков выполняются не в виде полуколец, а в виде ленты с необходимым профилем поперечного сечения (см. рис. 193, *г*, *д*), завитой в винтообразную спираль требуемого диаметра с большим количеством витков.

Заготовки усиков отрезают от листа в виде прямых полос и затем на специальном полуавтомате загибают в U-образный профиль и свивают в спираль необходимого диаметра. При сборке уплотнений от спирали отрезают с небольшим запасом куски, равные длине окружности паза. Отрезанную заготовку заводят в паз на валу ротора или во втулке. Внутрь U-образного сечения заготовки усика заводят уплотнительную проволоку, которую расчеканивают для получения необходимой плотности соединения. Для расчеканки используется специальная широкая оправка в виде зубила с особыми зубчиками на рабочей части, с помощью которой зачеканка усиков осуществляется вручную, или эта операция выполняется на токарном станке с помощью специальной роликовой оправки, закрепляемой в суппорт. Сила нажатия ролика может быть отрегулирована за счет пружинного устройства, вмонтированного в оправку.

Глава XIX. ОБРАБОТКА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ И СБОРКА ЗУБЧАТЫХ ТУРБИННЫХ РЕДУКТОРОВ

1. Обработка зубчатых колес редукторов турбин

В турбинных установках применяют редукторы для передачи вращения компрессорам, воздуходувкам, генераторам, насосам и другим рабочим машинам. Зубчатые колеса больших размеров работают с окружными скоростями 25—60 м/с и выше и передают крайне высокие мощности — до 50 тыс. кВт и более. Схемы зубчатых передач в турбинных редукторах встречаются различные. О размерах турбинного редуктора можно создать себе представление по размерам колеса (рис. 198, *а*), обработанного под нарезание зубьев, и по окончательно обработанной шестерне (рис. 198, *б*).

Допуски цилиндрических эвольвентных зубчатых колес и передач при $m = 1 \div 50$ мм, диаметре делительной окружности колес до 5000 мм, межосевом расстоянии до 5000 мм регламентированы ГОСТ 1643—56. Обычно турбинные редукторы изготовляют в пределах 3—5 степеней точности по данному стандарту.

Рекомендуемые технические условия при нарезании колес и шестерен уникальных передач приведены в табл. 29. Подробно с системой допусков зубчатых передач целесообразно ознакомиться в специальной литературе.

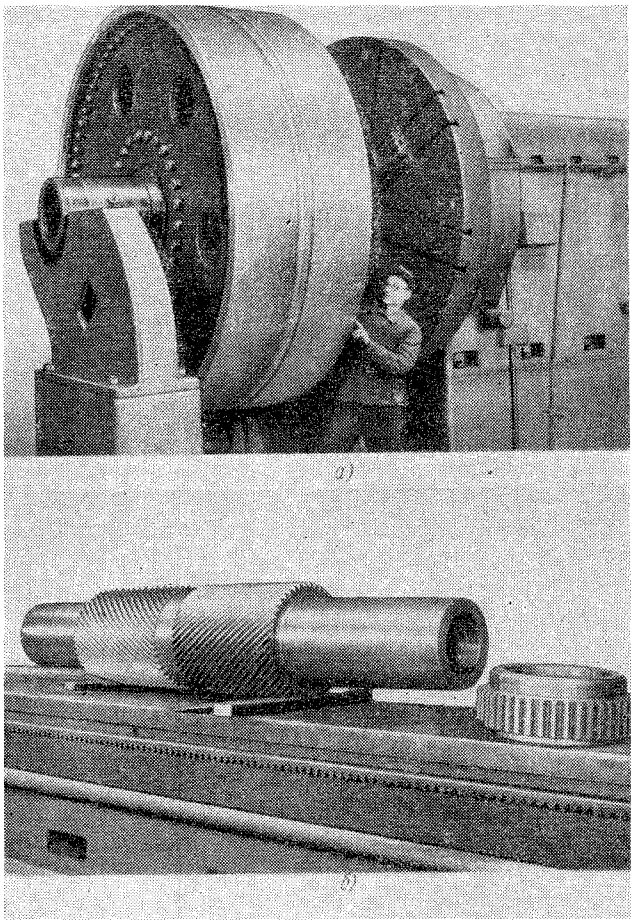


Рис. 198. Зубчатые передачи турбинных редукторов

Для обеспечения к точности изготовления зубчатых передач требуется прецизионное оборудование и выполнение надлежащих условий их эксплуатации. В первую очередь необходимо: устанавливать оборудование на изолированных фундаментах, исключающих влияние колебаний почвы; сохранять в любое время года постоянную температуру (20° С); соблюдать нормы

Таблица 29

Технические условия нарезания зубчатых колес турбинных редукторов

Элементы проверки	Количество точек промеров	Отклонения (в мм) для диаметров			Измерительный инструмент и цена его делений в мм
		100—400 мм	2,5—3 м	3—4 м	
Шаг по начальной окружности от зуба к зубу в нормальной плоскости	В шести группах, равномерно распределенных по окружности, по три шага в каждой группе, в двух сечениях каждого обода	0,015	0,02	0,025	Шагомер 0,002
Максимальная амплитуда кривой накопленных ошибок группового шага по начальной окружности	В среднем сечении каждого обода	—	0,20	0,275	Специальный шагомер 0,002
		Количество зубьев в группе			
			11	9	
Толщина зуба в нормальной плоскости	В шести равномерно распределенных по окружности группах, по три зуба в каждой группе, в двух сечениях каждого обода. При замерах вносить поправки на биение, овальность и фактический диаметр обода	0,00—0,025	0,00—0,03	0,00—0,04	Оптический зубомер 0,02
Разнотолщинность вдоль одной спирали	В шести равномерно распределенных по окружности группах, по три зуба в каждой группе, в двух сечениях каждого обода	0,02	0,03	0,03	То же
Разность между толщинами зубьев в двух ободьях одного и того же колеса в крайних сечениях	В шести равномерно распределенных по окружности группах, по три зуба в каждой группе, в двух сечениях каждого обода	0,03	0,07	0,07	»
Биение по шейкам колеса при установке на зуборезном станке	В шести равномерно распределенных по окружности точках	0,02	0,03	0,03	Индикатор 0,01
Биение по наружному диаметру ободьев	То же		В пределах биения по паспорту токарной обработки		То же

Элементы проверки	Количество точек промеров	Отклонения (в мм) для диаметров			Измерительный инструмент и цена его делений в мм
		100—400 мм	2,5—3 м	3—4 м	
Биение по базовому торцу при установке на зуборезном станке	В шести равномерно распределенных по окружности точках	—	0,03	0,03	Индикатор 0,01
Разность наружных диаметров каждого обода колеса	В двух крайних сечениях каждого обода		0,10	0,12	Мерительная лента, микрометрическая скоба

Примечания: 1. Боковая поверхность зубьев после нарезания не должна иметь рисок, ряби, дробления, уступов.
2. Нарезание зубьев должно производиться червячной фрезой, методом обкатки.
3. Контакт — не менее 70—80% по длине зубьев.

и технически обоснованные режимы зубофрезерования; тщательно соблюдать правила периодической проверки оборудования на точность его работы в период эксплуатации.

Нарезание зубчатых колес турбинных редукторов осуществляют на прецизионных станках при помощи червячных фрез. Колеса диаметром до 5000 мм и шириной до 2000 мм нарезают на станках вертикального типа. Валы-шестерни турбинных редукторов диаметром до 1000 мм при наибольшей длине 3000 мм нарезают на горизонтальных зубофрезерных станках.

Технологический процесс нарезания зубьев высокого класса точности строится по следующей схеме: черновое нарезание зубьев; чистовое нарезание зубьев; термическая обработка для придания повышенной твердости зубьям; отделка шлифованием, притиркой или шевингованием. При нарезании крупных редукторных колес зубоотделка исключается в связи с отсутствием специальных крупных зубоотделочных станков. Нарезание в зубчатых колесах заданного числа зубьев с определенным углом наклона спирали осуществляется с помощью подбора сменных колес дифференциала станка. Нарезаемое колесо устанавливают на специальную чугунную стойку, ранее закрепленную к планшайбе станка.

Перед нарезкой колеса выверяют на биение по окружности и торцу обода. Биение по верхней шейке допускается не более 0,01 мм, по торцу обода — не более 0,025 мм. Отклонение индикатора вдоль образующей верхней шейки на длине 500 мм — не более 0,02 мм. При наладке станка особое внимание уделяют правильной установке фрезы на станке. Перед установкой фрезы тщательно проверяют биение оправки.

При черновой нарезке оставляют припуск в пределах 0,1—0,15 модуля нарезаемого колеса. Глубина резания для чернового прохода (до модуля 8) принимается на полную глубину зуба с учетом припуска на чистовой проход. Для чистового фрезерования рекомендуется применять однозаходную фрезу, а для чернового — трехзаходную. Резание производят при обильном охлаждении фрезолом, подаваемым под большим давлением. При черновом фрезеровании рекомендуется скорость резания 7—10 м/мин, глубина резания 12—18 мм и подача на оборот стола 1—1,2 мм; при чистовом фрезеровании скорость резания 10—14 м/мин, частота вращения 20—26 об/мин, подача на оборот стола 0,8—1 мм. Приведенные режимы относятся к фрезам средних модулей (5—6).

2. Обработка корпусов редукторов

Корпусы редукторов изготовляют литыми, сварными и сварно-литыми. По сравнению с литыми сварные и сварно-литые корпусы имеют большие преимущества, которые заключаются в отсутствии заварки литейных пороков и возможности производить обдирку посадочных мест в отдельных свариваемых впоследствии заготовках, а не в цельных корпусах, обработка которых требует применения крупных станков.

При обработке корпусов необходимо соблюдать следующие технические требования:

а) в нижних основаниях корпусов при их габаритах до 1500 мм допускается неплоскостность не более 0,1 мм, а при габаритах свыше 2500 мм — не более 0,2 мм;

б) плоскость основания в сопряжении с верхней крышкой может иметь местный зазор в районе расположения подшипников не более 0,05 мм, а в других местах — не более 0,08 мм;

в) несовпадение осей расточек подшипников с плоскостью разъема корпуса при диаметре расточки не свыше 300 мм допускается не более 0,2 мм, а при диаметре расточки свыше 300 мм — не более 0,3 мм;

г) скрещивание осей расточек допускается не свыше 0,06 мм на длине 1000 мм;

д) овальность и конусность расточек мест под подшипники допускается не более чем в пределах половины установленных допусков на диаметры расточек;

в) отклонения между осями расточек под подшипники при расстоянии между осями 200—1200 мм допускаются не более 0,05—0,1 мм; при расстоянии между осями 1200—2000 мм допускаются отклонения не более 0,14—0,18 мм.

В чугунных и стальных отливках, поступающих в механический цех, должны быть заварены все дефектные места. После этого отливки должны быть термически обработаны и очищены дробеструйными аппаратами.

Механическая обработка корпусов редукторов состоит из следующих основных операций.

1. Разметочная: нанесение осевых рисок, обеспечивающих равномерное распределение припусков в местах расточек, а также рисок, определяющих положение плоскостей разъемов и оснований, и других рисок, определяющих контуры обработки корпусов.

2. Предварительная обработка плоскостей разъема и основания на продольно-строгальных или продольно-фрезерных станках, с оставлением припусков по 3—5 мм на сторону для последующей обработки; после выполнения этой операции деталь отправляют на термическую обработку для снятия внутренних напряжений;

3. Разметочная под окончательную обработку: проверка и нанесение разметочных рисок по всем обрабатываемым плоскостям с целью определения фактически оставшихся припусков в связи с деформациями, образовавшимися в процессе черновой и термической обработки.

4. Обработка нижней части корпуса: на продольно-строгальном станке обрабатывают плоскости разъема и основание корпуса. Чистовые проходы выполняют аналогично обработке корпусов турбин широкими резцами при скорости резания 10 м/мин и глубине — 0,3 мм.

Для устранения необходимости в последующей шабровке плоскости разъемов корпусов более целесообразно обрабатывать на продольно-фрезерных или расточных станках с применением тонкого шабрящего фрезерования, осуществляемого фрезерной головкой, имеющей режущие пластины из твердого сплава Т15К6, с широкой кромкой. Шабрящая фреза работает при малой глубине и большой подаче. Так, например, при обработке стального корпуса с шириной фрезерования $B = 200 \div 320$ мм фрезой $D = 250 \div 400$ мм рекомендуется глубина фрезерования $t = 0{,}1 \div 0{,}2$ мм; подача $s = 1{,}5 \div 1{,}8$ мм/об; подача $s_м = 350 \div 370$ мм/мин; скорость резания $v = 183 \div 188$ м/мин. После такой обработки чистота поверхности достигает 6—7-го класса, а неплоскостность — не более 0,01 мм на 1 м длины.

Окончательная обработка верхней части корпуса или крышки производится совместно с боковыми крышками, соединяемыми с корпусом вертикальными разъемами. Для этого в крышках предварительно фрезеруют плоскости горизонтального разъема и окончательно — вертикальный разъем. В зависимости от размеров крышек фрезерование осуществляют на вертикально-фрезерном или расточном станке. После фрезерования сверлят отверстия в вертикальной плоскости, по кондуктору или по разметке.

Затем соединяют боковые крышки с верхней частью корпуса и производят окончательное строгание плоскости горизонтального разъема, аналогично обработке нижней части. В условиях се-

рийного производства строгание верхней части корпуса производят в специальном приспособлении.

5. Сверлильная: сверление отверстий, расположенных в плоскости разъема, по накладным кондукторам или по разметке, что определяется серийностью производства. Отверстия под установочные болты сверлят предварительно с припуском по 1,5—2 мм на сторону на радиально-сверлильном станке.

6. Слесарная: сборка верхней и нижней части корпуса с боковыми крышками под растачивание; проверяют щупом зазор между корпусом и крышкой. Сборку корпуса под растачивание обычно производят на специальном стенде.

7. Окончательная обработка установочных отверстий: рассверливание, зенкерование и развертывание установочных отверстий в собранном корпусе при помощи переносного сверлильного станка.

8. Растачивание посадочных мест. Одной из наиболее ответственных операций при обработке корпусов редукторов турбин является растачивание отверстий в собранном корпусе. В единичном производстве и при небольших размерах обрабатываемой детали ее устанавливают на стол расточного станка и при помощи борштанги с центрирующим люнетом растачивают поочередно все отверстия путем перемещения стола с закрепленной на нем деталью. Обработку крупных корпусов производят на расточных станках с перемещаемой колонной; при этом деталь устанавливают на плиту, а отверстия в ней растачивают поочередно путем перемещения шпинделя станка вместе с борштангой.

В серийном производстве более целесообразным является одновременное растачивание всех отверстий в собранном корпусе (рис. 199). Обработка выполняется при помощи резцовых головок или летучих суппортов *4*, насаженных на борштанги *3*, поддерживаемые люнетами *2*, установленными на плите *1*. Положение люнетов регулируется при помощи раздвижных клиньев и окончательно фиксируется после установки борштанг. В целях обеспечения точности межцентровых расстояний между обрабатываемыми отверстиями, борштанги монтируют при помощи уровня и микрометрического штихмаса. Каждая борштанга имеет отдельный привод, состоящий из коробки скоростей и подач и электродвигателя. Такой способ обработки отверстий позволяет увеличить производительность труда в 2 раза и более. Проверку межцентровых расстояний и замеры величины скрещивания осей борштанг и осей валов редуктора производят инструментами и приборами, показанными на рис. 200 и 201.

Для растачивания отверстий применяют механизированные борштанги, аналогичные применяемым при обработке корпусов турбин на расточном станке. Подрезка торцовых плоскостей выполняется двумя способами: плоскости небольших размеров подрезают всей режущей кромкой подрезного резца при помощи борштанги, перемещая ее в осевом направлении; плоскости боль-

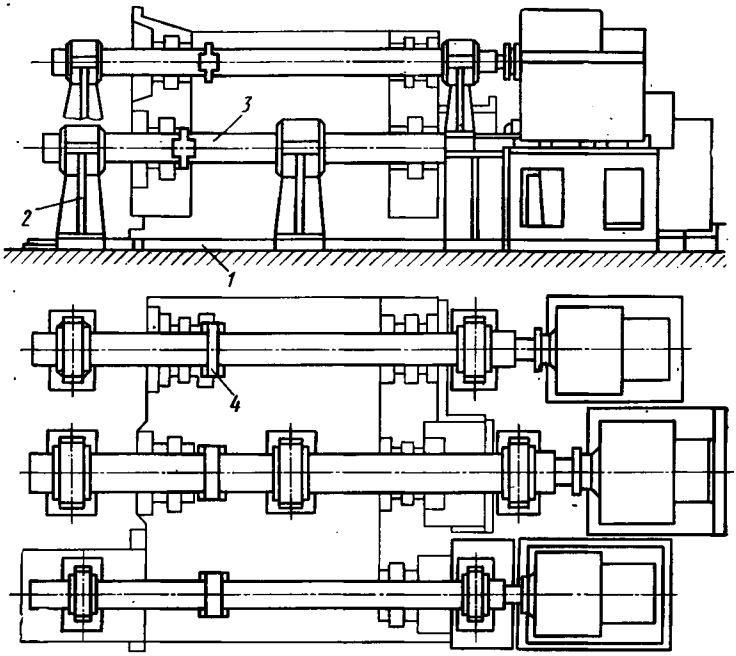


Рис. 199. Схема стенда для растачивания корпуса редуктора

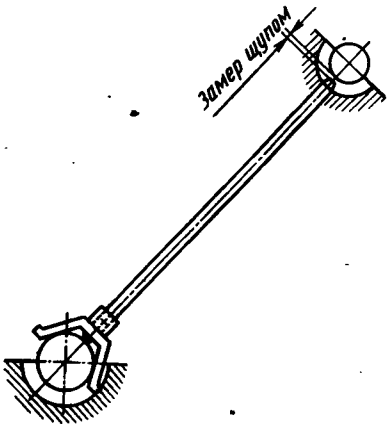


Рис. 200. Штихмас для измерения межцентровых расстояний

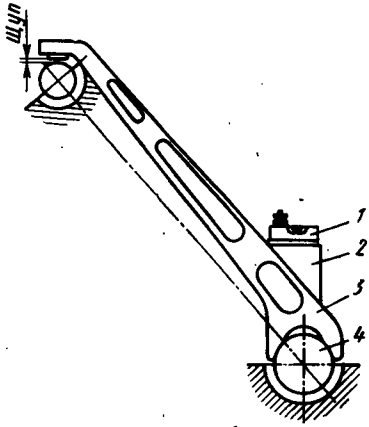


Рис. 201. Прибор для измерения скрещивания осей валов редуктора:

1 — уровень; *2* — подставка; *3* — кронштейны; *4* — фальшвал

ших размеров подрезают резцовыми головками (см. рис. 199), которые в механизированной борштанге позволяют перемещать резец в радиальном направлении.

9. Сверлильная: сверление отверстий в обработанных торцовых плоскостях по кондуктору или по разметке.

10. Испытание на герметичность: при испытании корпусов небольших размеров в их полость наливается керосин, их наружная поверхность окрашивается мелом; при наличии течи, на белой наружной поверхности корпуса появится пятно. Корпусы больших размеров подвергают гидравлическому испытанию с давлением 15 Н/см^2 (1,5 кгс/см^2).

После окончания процесса механической обработки корпусы передают на сборку вместе с паспортами, куда заносят фактические размеры диаметров расточек под вкладыши, межосевые расстояния между отверстиями и данные относительно параллельности их осей.

3. Сборка и обкатка редукторов

При сборке необходимо обеспечить надежную работу редукторов с нормальным износом и шумом, правильно расположить оси валов в корпусах, выдержав их параллельность, и соблюсти межцентровые расстояния в соответствии с установленными допусками.

Установка корпуса на сборочный стенд. Редукторы собирают на специальных сборочных стендах. Перед установкой корпуса на сборочный стенд тщательно проверяют состояние его нижней опорной плоскости на отсутствие механических повреждений. Затем устанавливают корпус на сборочную плиту стенда и проверяют щупом в нескольких местах зазор между нижней плоскостью корпуса и плоскостью плиты. Величина зазора не должна быть более 0,1 мм. После проверки зазоров корпус крепят к плите в трех местах при помощи болтов. При этом большое внимание уделяют обеспечению равномерности затяжки болтов, чтобы не допустить деформации корпуса.

Небольшие жесткие корпусы редукторов устанавливают непосредственно на сплошные фундаментные плиты. Крупные корпусы ставят плоскостью нижнего фланца на три клиновых домкрата, расположенных симметрично по отношению к оси редуктора, или на три шлифованные прокладки одинаковой толщины. Затем накладывают контрольную линейку на верхнюю плоскость фланца корпуса и при помощи уровня регулируют его установку, обеспечивая горизонтальность плоскости с точностью до 0,1 мм на 1 м. Затем крепят болтами нижние фланцы к плите у каждой опорной площадки, производят равномерную затяжку болтов, не допуская деформации фланца корпуса. Отсутствие деформации при затяжке болтов контролируют индикаторами, установ-

ленными на сборочную плиту и контактирующими с фланцем корпуса.

После проверки правильности установки корпуса монтируют вкладыши в посадочные места нижней части корпуса и крышки подшипника с проверкой по краске, наносимой на поверхность расточек. Наружная поверхность вкладышей должна иметь контакт не менее 70% всей опорной поверхности; зазор у разъема вкладышей не должен превышать 0,04 мм. При наличии во вкладышах буртов следует раньше производить пригонку вкладышей по торцовым плоскостям, прилегающим к торцам расточек, допуская общий зазор не свыше 0,1—0,2 мм. Зазор проверяют у плоскости разъема. При отсутствии требуемого зазора шабрят по следам краски сопрягаемую поверхность вкладыша. После такой пригонки проверяют суммарный зазор по свинцовым оттискам. Такой метод проверки зазоров подробнее освещен при описании процесса общей сборки турбин. Если измерения показывают недопустимо большую величину суммарного зазора, то шабрят плоскости разъема крышки, а если зазор отсутствует, то шабрят плоскости разъема вкладыша, обеспечивая минимально необходимый зазор, так как натяг здесь также недопустим.

Методы центровки зубчатых колес и вкладышей. Центровка зубчатых колес является одной из наиболее ответственных операций процесса сборки редуктора, так как определяет требуемый контакт зацепления зубьев и их межцентровое расстояние.

В практике турбиностроения пользуются двумя методами центровки зубчатых передач редукторов.

При использовании первого метода добиваются строгой параллельности осей шестерен (валов) относительно оси главного зубчатого колеса. В соответствии с этим данный метод называют *методом параллельных осей.*

При использовании второго метода за основу принимают не взаимное положение осей валов — шестерен и колес, а их непосредственное сопряжение, т. е. контакт профильных поверхностей зубьев, определяющийся в данном случае равномерностью бокового зазора в любом торцовом сечении по всей ширине зацепления. Правильность сопряжения поверхностей зубьев шестерен и колес редуктора достигается изменением положения оси вала шестерни по отношению к оси вала колеса. Качество сопряжения контролируется снятием свинцовых оттисков по всей ширине зацепления. Этот метод называют *методом центровки по свинцовым оттискам.*

Центровка методом параллельных осей требует применения большого количества специальной оснастки; при центровке по свинцовым оттискам почти никакой оснастки не требуется. В связи с этим применение метода центровки по свинцовым оттискам более целесообразно в единичном производстве, а также при ремонтных работах в процессе эксплуатации трубин. Центровка

методом параллельных осей может быть рекомендована для условий серийного производства редукторов, когда применяемая оснастка может быстро окупиться.

Рассмотрим технологическую последовательность центровки редуктора методом параллельных осей с применением контрольных валов. Для центровки используются контрольные валы или оправки (рис. 202), на которых предусматриваются шейки d_2 для пригонки вкладышей и d_1 измерения межцентровых расстояний между валами.

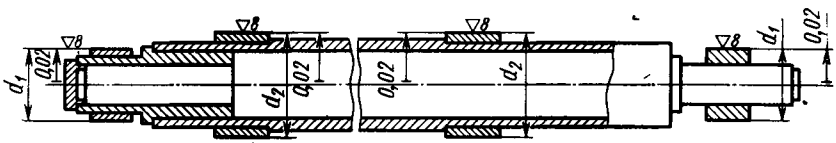


Рис. 202. Контрольный вал

Диаметры шеек контрольных валов ($d_2 = D_в$) определяются по формуле

$$D_в = d_ш + \delta,$$

где $d_ш$ — максимальный диаметр шейки вала шестерни или колеса;

δ — масляный зазор во вкладыше.

Таким образом, шейки контрольных валов оказываются несколько полнее шеек рабочих валов.

Поступившие на сборку вкладыши должны иметь технологический припуск по баббиту в пределах 0,1—0,2 мм. На вкладыши вала главного зубчатого колеса редуктора, как правило, оставляется несколько меньший припуск по сравнению с припусками на других вкладышах, так как он укладывается первым и принимается за базу при последующей центровке осей шестерен. Поэтому меньшего припуска на вкладышах колеса оказывается вполне достаточно для его прицентровки и получения нужного прилегания вала на вкладышах.

Укладку и пригонку начинают с контрольного вала главного колеса в нижней части корпуса редуктора. После его пригонки укладывают верхнюю половину корпуса на нижнюю с установкой контрольных штифтов и болтов для обжатия фланцев горизонтального разъема редуктора. По маркировкам устанавливают в гнезда все вкладыши шестерен и укладывают в них контрольные валы. Вследствие наличия припуска на вкладышах и полноты контрольных валов последние не войдут во вкладыши и будут лежать на их боковых кромках. Производя последовательное шабрение вкладышей по бокам, добиваются полного прилегания контрольных валов во вкладышах шестерен. В процессе шабрения вкладышей все время проверяют расстояния между осями при

помощи специального штихмаса и щупа по концам контрольных валов.

При центровке добиваются предусмотренного чертежом межцентрового расстояния между осями и необходимой параллельности осей валов. О допустимых отклонениях судят по разности замеров на обоих концах контрольных валов, произведенных в одной плоскости, проходящей через обе оси.

В процессе пригонки контрольных валов проверяют параллельность осей и их межцентровое расстояние, определяют величину скрещивания или перекоса осей в пространстве. Для

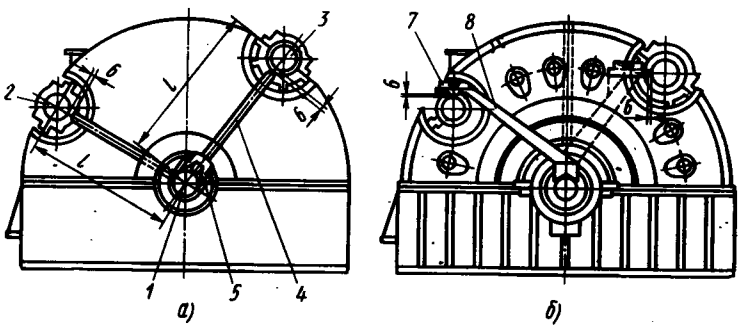


Рис. 203. Схемы замеров:

а — параллельности осей редукторов; *б* — скрещивания осей; *1* — *3* — контрольные валы; *4* — штихмасы; *5* — призма; *6* — зазоры, определяемые щупами; *7* — уровни; *8* — кронштейны; *l* — межцентровые расстояния

этой проверки используют специальные контрольные средства, аналогичные применяемым при растачивании корпусов редукторов (см. рис. 200 и 201).

По разнице показаний прецизионного уровня, устанавливаемого на обоих концах контрольных валов, судят о фактической величине скрещивания или перекоса осей контрольных валов. Имеющийся перекос устраняют шабрением баббита нижних половин вкладышей. Схемы замеров при проверке скрещивания осей валов и межцентровых расстояний показаны на рис. 203.

Шабрение вкладышей и замеры в процессе центровки выполняются несколько раз до получения одинаковых показаний уровня на обеих концах контрольных валов с определением точности межцентровых расстояний по штихмасам.

При предварительной пригонке нижних половин вкладышей оставляют некоторый припуск на окончательную пригонку и приступают к пригонке верхних половин, что выполняют по тем же контрольным валам. Перед началом пригонки верхние половины вкладышей устанавливают в верхние крышки корпуса редуктора и стопорят винтами. Шабрение верхних вкладышей производят до того момента, когда станет возможным проворачивать конт-

рольный вал от руки рычагом длиной 600 мм, при затянутых болтами крышках корпуса редуктора.

Обработку баббита вкладышей шабрением производят с учетом направления действия нагрузки с точностью прилегания шейки к вкладышу по краске не менее двух-трех пятен на 1 см^2.

После пригонки верхних половин вкладышей производят весь комплекс замеров, определяющих качество центровки: Обычно пригонку вкладышей по контрольным валам считают законченной, если параллельность осей и их скрещивание не превышает 0,05 мм на 1 м.

После окончания центровки и шабрения вкладышей редуктора по контрольным валам производят разборку корпуса. На вкладышах производят расшабровку масляных холодильников и проточку аварийных поясков, если они предусмотрены чертежами турбины.

Для полной характеристики качества центровки передач необходимо иметь данные по боковому зазору в зацеплении и пятну контакта зубьев. Эти данные могут быть получены при укладке в корпус редуктора зубчатой передачи.

После укладки передачи в корпус редуктора проверяют контакт зубьев колес по следам краски. При этой проверке может выявиться необходимость проведения дополнительных подгоночных работ и шабрения вкладышей.

Если центровка не дает требуемого контакта зацепления, то производят обкатку зубчатых пар с применением пасты ГОИ. При обкатке снимается лишь очень незначительный слой металла толщиной до 0,03 мм, вследствие чего данным способом нельзя устранить отклонения, достигающие в крупных зубчатых передачах до 0,05 мм. Обкатку производят при небольших скоростях (до 3 м/с). Используемую пасту через каждые 60 мин смывают керосином и заменяют свежей. Для получения хорошего контакта зацепления обкатываемую зубчатую пару нагружают небольшой нагрузкой (до 1% рабочей) при помощи тормоза, который действует на вал главного зубчатого колеса. Обкатка крупных редукторов длится до 15 ч, малых — до 6 ч. В единичном производстве обкатку зубчатых пар выполняют непосредственно в собранном корпусе редуктора, в серийном — вне корпуса, на специальных стендах.

Получив удовлетворительные результаты центровки с обеспечением чертежных зазоров по зацеплению и наружному контакту, производят пригонку специальных скоб (рис. 204) и микрометрических винтов (рис. 205), которые используются для проверки неизменности заводской центровки редукторов в процессе эксплуатации турбин. В случае необходимости замены старого вкладыша новым, положение шейки во вкладыше, зафиксированное в вертикальной и горизонтальной плоскостях, может быть всегда восстановлено при пригонке нового вкладыша.

После выполнения работ по центровке, укладке и сборке передач, а также предварительной пригонке и сборке всех других узлов и деталей редуктора, его вновь разбирают, детали очища-

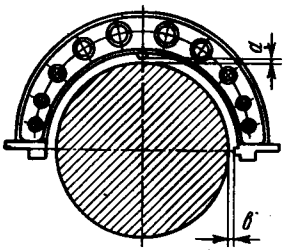


Рис. 204. Контрольная скоба:

а и *в* — контрольные размеры

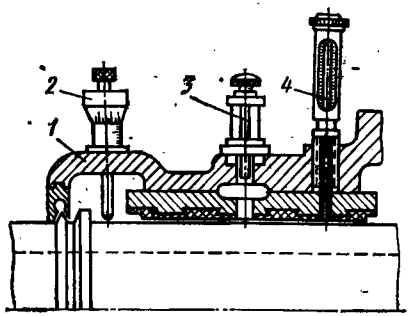


Рис. 205. Опорный подшипник с приборами контроля:

1 — корпус; *2* — микрометрический прибор контроля положения вала; *3* — маслоконтрольный прибор; *4* — термометр с оправкой

ют сжатым воздухом, промывают и консервируют. Все открытые места и присоединительные фланцы закрывают временными заглушками и пломбируют.

Глава XX. СВАРОЧНО-ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

В современных паровых и газовых турбинах сварка находит самое широкое применение. Сварными изготовляются роторы, цилиндры, диафрагмы, корпусы подшипников и вспомогательных механизмов и другие элементы турбин. Детали, работающие при высокой температуре, изготовляют из хромомолибденовой, хромомолибденованадиевой и аустенитной сталей. Заготовки для деталей сварных конструкций могут быть литыми, коваными или вырезанными из листового проката.

При выборе материалов для сварных конструкций и разработке технологии сварки большое значение имеет учет их свариваемости. Исходя из требований улучшения качества сварки, целесообразно использовать для сварных конструкций стали с относительно низким содержанием углерода — 0,2—0,3%.

Свариваемость легированных сталей, как правило, хуже, чем углеродистых, поэтому их применение приводит к необходимости введения в процесс сварки особых технологических приемов, в первую очередь подогрева свариваемых конструкций.

Кованые и литые заготовки готовят под сварку механической обработкой. Заготовка листовых деталей осуществляется газовой

резкой или резкой на ножницах. От качества реза и точности размеров заготовки зависит объем работ по подгонке деталей при сборке их под сварку. Ручная газовая резка не обеспечивает должного качества заготовки; необходимое качество реза обеспечивается лишь при использовании газорезательных автоматов.

Внедрение флюсо-газовой, воздушно-дуговой и плазменной резки дает возможность резать не только углеродистую сталь, но и любые другие металлические материалы.

При сварке сложных конструкций, к которым предъявляются высокие требования в части качества сварки и соблюдения геометрических размеров, свариваемые детали предварительно собирают на специальных стендах, прихватывают, а затем производят окончательную сварку и термическую обработку. В крупных паровых турбинах типа К-200-130 выхлопные части корпусов цилиндра НД изготовляют сварными из листового проката толщиной 16—24 мм. Такая конструкция позволяет упростить соединение корпуса турбины НД с приемным патрубком конденсатора, осуществляемое при помощи сварки. Заготовками для корпуса являются вырезки из листа и фасонный прокат с толщиной листа для фланцев до 120 мм.

Широко используется унифицированная сварная выхлопная часть цилиндра НД ЛМЗ, применяемая для различных типов турбин (К-50-90, К-100-90 и др.). Ее вес равен всего 8,7 т, в то время как вес нижней литой части составляет 24,2 т, при габарите 5,6 × 3,7 м.

Унифицированная выхлопная часть цилиндра НД состоит из сваренных между собой 246 деталей. В целях уменьшения деформации и сокращения цикла обработки применяют наиболее рациональный процесс последовательной сварки технологических узлов, заключающийся в следующем: отдельные детали собирают в технологические подузлы и сваривают их. Затем эти подузлы собирают в более крупные технологические узлы и производят их сварку. После этого уже собирают все узлы в общую конструкцию и сваривают их окончательно. Качество сварочных швов определяют путем проверки их на плотность керосиновой пробой. После сварки выхлопные части цилиндров термически обрабатывают в электропечах для снятия внутренних напряжений.

Применение сварки при изготовлении конденсаторов приобретает особое значение в паровых турбинах больших мощностей в связи с их большими весом и размерами. В связи с этим окончательную сборку и сварку конденсаторов производят заказчики, а заводы-изготовители турбин сваривают лишь их отдельные части. Наиболее тяжелая часть транспортируемого конденсатора весит около 18,2 т. Трудоемкость сборки и сварки конденсатора составляет значительную долю всей трудоемкости изготовления изделия.

Для изготовления конденсатора применяют стальные листы из углеродистой стали марки Ст3, которые сваривают на автомате. Затем сваренные листы вальцуют для придания требуемой формы. После сборки корпуса с другими деталями на сборочном стенде производят окончательную сварку. Контроль швов на плотность осуществляют, так же как и при изготовлении выхлопных частей, керосиновой пробой.

Сварочные автоматы имеют в производстве турбин широкое применение. Сварка диафрагм осуществляется в среде углекислого газа на полуавтоматической установке, которая обеспечивает быструю центровку диафрагм и кантовку ее без использования подъемного крана. Установка дает возможность плавно регулировать режим сварки.

Процесс сварки крупногабаритных деталей турбин, например цилиндра (см. рис. 140), также разбивают на этапы. Сначала производят сборку и сварку отдельных элементов, которые после сварки термически обрабатывают при $t = 1100°$ С. После раздельной термической обработки элементов производят их общую сборку и сварку всего цилиндра.

При сварке конструкций из легированных сталей требуется применять те или иные методы подогрева, которые создают необходимый тепловой режим как для ведения самого процесса сварки, так и процесса термической обработки. Для предупреждения образования деформаций применяют специальные приспособления.

Сварку составных частей ротора осуществляют в специальном приспособлении, снабженном прижимами, регулирующими величину натяга, возникающего от теплового расширения деталей ротора в процессе сварки. При сварке ротор вращают и сварные швы накладывают в строго определенной последовательности. Проверяют качество сварки специальным приспособлением на биение ротора и производят травление швов. Затем ротор термически обрабатывают в электропечи, установив его в горизонтальное положение и непрерывно вращая.

Качество сварных роторов в значительной степени зависит от правильности выбора термического цикла сварки и термической обработки после сварки. В связи с применением для сварных роторов легированных перлитных сталей с содержанием углерода 0,2—0,35% обязательным условием их сварки является подогрев до температур 300—450° С.

При изготовлении роторов из аустенитных сталей подогрева при сварке не требуется.

Наиболее эффективным методом подогрева роторов является индукционный нагрев. Он может производиться непосредственно в процессе сварки. Установка на роторе индукторов оставляет место сварки доступным и не мешает сварщику в его работе. Общий подогрев роторов в нагревательных печах является менее экономичным и ухудшает условия работы сварщика.

Режим термической обработки деталей после сварки зависит от химического состава их материала и устанавливается отделом главного металлурга предприятия. Термическая обработка роторов после сварки в печах с вращением ротора, устанавливаемого в горизонтальном положении, обеспечивает хорошие результаты.

Более подробно сварные конструкции и процессы сварки элементов паровых и газовых турбин освещаются в специальной литературе.

Глава XXI. ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Инструментальное производство на машиностроительных заводах, в том числе и на турбинных, сосредотачивается в основном в инструментальных цехах, являющихся ведущей составляющей единицей инструментального хозяйства завода. Задачей инструментального хозяйства является обеспечение завода всеми видами технологического оснащения, т. е. инструментами и приспособлениями, необходимыми для выполнения производственной программы. При изготовлении турбин применяется большое количество специальной оснастки. В качестве примера можно привести следующие данные: для изготовления мощной паровой турбины типа К-300-240 (мощностью 300 тыс. кВт), состоящей на 36% из оригинальных деталей, потребовалась оснастка только нулевой группы (оснастка, без которой вообще невозможно изготовлять данную турбину) и первой очереди (обеспечивает выпуск базовых деталей), включающая 228 приспособлений, 799 типоразмеров режущих, измерительных и вспомогательных инструментов, 35 кондукторов и 4 крупных штампа. Примерно такое же количество оснастки понадобилось только для лопаточного производства. Следует учесть, что нулевая группа и первая очередь составляют в целом лишь 40—60% объема всей оснастки, необходимой для обеспечения выпуска турбины в соответствии с запроектированной технологией.

В функции инструментального хозяйства входит также проверка обеспечения инструментом текущей программы завода, планирование производства дублеров инструментов и запасных частей для эксплуатирующихся приспособлений, организация централизованной заточки инструментов, получение стандартизованных иструментов со стороны, организация хранения и эксплуатации технологической оснастки на заводе. По мере развития комплексной механизации основного производства и совершенствования технологических процессов роль инструментального хозяйства в производственном процессе завода будет все более увеличиваться.

Инструментальные цехи на турбинных заводах в основном являются комплексными. В объем их работ входит изготовление и ремонт специальных приспособлений, режущих и измерительных инструментов, восстановление режущих инструментов и их заточка. Для выполнения указанных работ инструментальные цехи турбиностроительных заводов обычно имеют в своем составе следующие производственные участки:

а) заготовительный — поставляющий заготовки всем другим участкам цеха;

б) приспособлений;

в) измерительных инструментов, с лекальным отделением;

г) режущих инструментов, с отделением изготовления резцов;

д) заточки (в том числе централизованной);

е) точной механики (ремонт и юстировка средств измерения);

ж) вспомогательных инструментов (изготовление различных оправок, слесарно-монтажных инструментов и т. п.);

з) термический.

Изготовление шаблонов. Технологический процесс изготовления шаблонов расчленяется на два этапа — до термической обработки и после нее. Заготовки для шаблонов нарезают из листовой стали толщиной 2—4 мм на пресс-ножницах. Нарезанные заготовки собирают в пакет, скрепляют заклепками и размечают по контуру. Затем на горизонтально-фрезерном и строгальном станках обрабатывают шаблоны по наружному контуру. После этого шаблоны подвергают термической обработке, которой и заканчивается первый этап процесса изготовления шаблонов.

Второй этап начинается шлифованием шаблонов по плоскости (с припуском 0,2 мм) и по боковым сторонам; последние становятся базами для последующей точной разметки шаблонов и окончательной их обработки по контуру. Поверхности заготовок оксидируют или окисляют посредством нагревания, что улучшает условия для нанесения разметки, которую производят штангенрейсмусом на разметочной плите.

Окончательная обработка шаблонов по профилю осуществляется на плоскошлифовальных станках, оснащенных универсальными приспособлениями для профильного шлифования. Более прогрессивной является обработка профилей шаблона на оптико-шлифовальных станках. Они позволяют вести наблюдение за обработкой профиля через микроскоп, при помощи пантографа и концевых мер длины, отсчитывать линейные размеры, а также определять угловые величины с помощью пантографа и поворотной головки с нанесенными на их лимбе делениями.

В качестве эталона при обработке на оптико-шлифовальном станке используют непосредственно чертеж профиля шаблона, увеличенного в 50 раз. Чертеж наносится на цинковый лист толщиной 2—4 мм, размером 500 × 500 мм. Построение профиля

выполняется на этом чертеже с точностью 0,1 мм, что допускает отклонения фактического контура шаблона от теоретического на величину не более 0,002 мм. Цинковый лист прикрепляют к планшету станка. На листе наносят осевые линии, которые являются базами для отсчета размеров профиля шаблона, а также для правильного ориентирования его осей по отношению к осям координатного стола станка. На рис. 206 показаны примеры конфигурации шаблонов, окончательно обрабатываемых без применения дальнейшей доводки профиля.

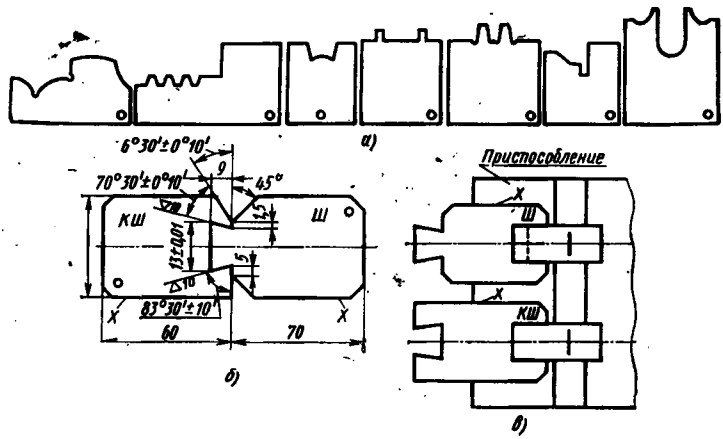


Рис. 206. Примеры шаблонов:

а — разновидность форм шаблонов; *б* — размеры и допуски (х — база для обработки профиля шаблона и контршаблона); *в* — пример применения шаблонов

Обработка профиля шаблонов производится также на профелешлифовальных станках, в которых обрабатываемый профиль получает теневое изображение и через оптическую систему проектируется на светлый экран с 50-кратным увеличением.

Окончательную доводку профиля шаблона осуществляют при помощи притира, покрываемого пастой ГОИ, оселка или мелкой крокусовой шкурки. Доводкой снимают гребешки высотой до 2 мкм, обеспечивая чистоту поверхности 11-го класса. При процессе доводки точность плоскостей проверяют лекальной линейкой, точность углов — угловой плиткой, а точность профиля — сравнением его с контршаблоном. Проверка может осуществляться также при помощи заранее настроенных измерительных инструментов (пассаметра, оптиметра и др.) или посредством рассмотрения с помощью инструментального микроскопа теневого изображения проверяемого профиля.

Изготовление шлицевых калибров. Одним из наиболее сложных видов лекальных работ в инструментальном производстве является изготовление шлицевых калибров (колец), имеющих

замкнутый профиль (рис. 207). Сложность обработки таких профилей заключается в необходимости соблюдения исключительно высокой точности их размеров и формы.

В технических условиях на изготовление шлицевых калибров допускаются следующие отклонения:

а) непараллельность плоскостей шлицевых пазов между собой и относительно продольной оси не более 0,003 мм;

б) смещение плоскостей сторон шлицевого паза относительно оси симметрии ±0,002 мм;

в) биение поверхности отверстия *А* относительно поверхности отверстия диаметром 45А не более 0,03 мм.

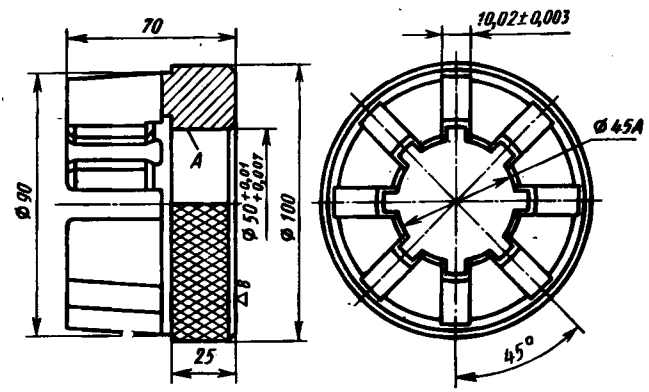


Рис. 207. Шлицевой калибр — кольцо

Заготовку для калибра обрабатывают на токарно-винторезном станке по наружной поверхности окончательно, а отверстие — оставляя припуск под шлифование. Затем с помощью делительной головки производят разметку шлицев. После этого фрезеруют пазы предварительно, оставляя припуск 1 мм. Фрезерование производят пазовой фрезой на горизонтально-фрезерном станке в специальном поворотном приспособлении. После фрезерования снимают заусенцы, и калибр термически обрабатывают. Далее заготовку устанавливают в патрон внутришлифовального станка и шлифуют отверстие *А*. Доводку отверстия по допускам второго класса точности производят чугунным притиром. После этого калибр устанавливают в координатно-универсальное или в делительное приспособление таким образом, чтобы паз оказался параллельным продольному ходу стола, и приступают к шлифованию пазов с припуском на доводку по 0,02 мм. Вначале шлифуют одну сторону паза, затем калибр поворачивают на 180° и шлифуют вторую сторону паза при возвратно-поступательном движении стола. Остальные пазы обрабатывают последовательно с необходимыми поворотами калибра.

После шлифования ширину паза проверяют при помощи концевых мер, а непараллельность — шлицевой пробкой. Доводку пазов выполняют при помощи чугунных притиров.

Изготовление фасонных фрез. Фасонная фреза (рис. 208) состоит из двух частей: хвостовой части *1*, изготовляемой из стали марки 40Х, и режущей части *2* — из быстрорежущей стали Р18.

Обе части фрезы обрабатывают раздельно на токарно-винторезном станке. Хвостовую часть зацентровывают и обрабатывают предварительно с припуском 0,5 мм. Обработку профильной части осуществляют, как правило, специальным профильным

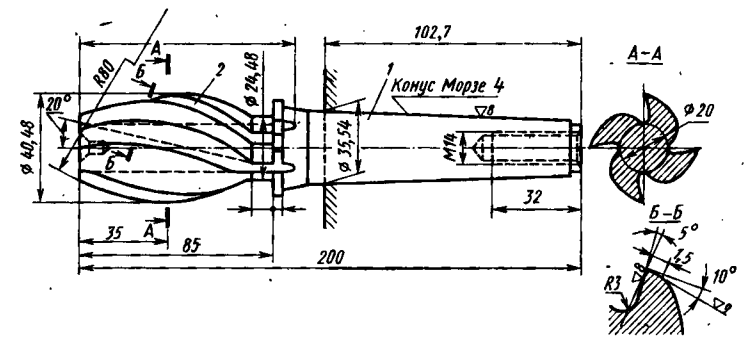


Рис. 208. Фасонная фреза с остроконечными зубьями

резцом. Затем обе половины заготовки фрезы сваривают, фрезеруют зубья на горизонтально-фрезерном станке, опиливают заусенцы, клеймят и термически обрабатывают. Режущую часть фрезы закаливают до твердости *HRC* 62—64, а хвостовую часть — до *HRC* 35—40. После термической обработки фрезу рихтуют, шлифуют центра, затачивают передние грани перьев на заточном станке и шлифуют конусную часть на круглошлифовальном станке. В завершающей операции затачивают задние грани зубьев фрезы на заточном станке.

Изготовление метчиков. В паровых турбинах широкое распространение имеют резьбовые соединения больших диаметров с точностью изготовления по второму классу. Нарезание внутренних резьб осуществляется при помощи крупных метчиков, вес которых достигает 20 кг. Обычно комплект таких метчиков состоит из 3 штук. Первый метчик снимает припуск до 70—85%, второй метчик — 10% и третий — до 5% припуска по высоте профиля (рис. 209). Метчики изготовляют из углеродистой или быстрорежущей стали. Технологический процесс изготовления метчиков состоит из следующих основных операций.

На токарно-винторезном станке производят обработку заготовки по наружному контуру. В крупных метчиках сверлят отверстие. Мелкие метчики центруют с двух сторон. Обработку

производят с припуском под шлифование. Затем фрезеруют стороны квадрата на горизонтально-фрезерном станке. На специализированных инструментальных заводах квадраты не фрезеруют, а штампуют на эксцентриковых прессах или выдавливают на гидравлических прессах. После изготовления квадрата у заготовки фрезеруют канавки на горизонтально-фрезерном станке, опиливают их острые кромки, клеймят и термически обрабатывают. Далее шлифуют центра (в малых метчиках) или отверстия (в больших метчиках). На заточном станке шлифуют канавки; затем на круглошлифовальном станке шлифуют наружную по-

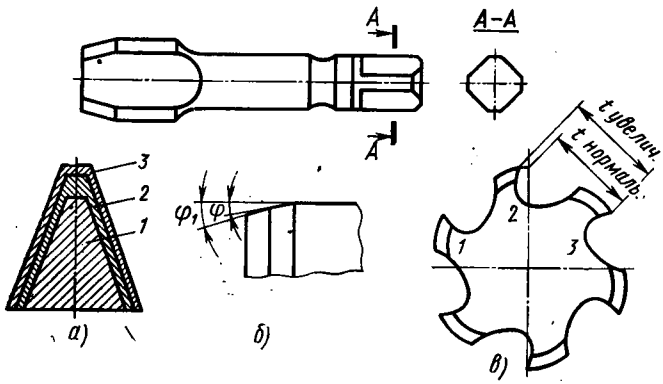


Рис. 209. Специальный метчик:

а — профили метчиков *1*—*3*; *б* — двойной угол заборного конуса (φ и φ_1 определяют опытным путем); *в* — неравномерность шага зубьев

верхность хвоста, а на резьбошлифовальном — профиль резьбы. В завершение шлифуют заборную часть метчиков. Заточку метчиков производят на заточном станке в специальном делительном приспособлении.

На специализированных заводах резьбу метчиков получают методом пластической деформации при помощи накатки; при этом в метчиках из углеродистой стали операция накатывания является завершающей. При изготовлении метчиков из быстрорежущей стали после накатывания резьба шлифуется на резьбошлифовальном станке.

Изготовление приспособлений. В машиностроении, вообще, и в турбиностроении, в частности, применяется большое количество самых разнообразных по назначению и конструкции приспособлений. При их изготовлении используются различные технологические процессы, практически все процессы, применяемые при изготовлении основной продукции. Во многих случаях изготовление приспособлений требует применения гораздо более сложных процессов, чем изготовление основной продукции. Кроме того, нередко и для изготовления самих приспособлений тре-

буется предварительное изготовление особой специальной оснастки, которую называют «оснасткой второго порядка». Описание всех процессов изготовления приспособлений в настоящем учебнике выполнить невозможно, да в этом и нет необходимости. Поэтому здесь можно ограничиться кратким рассмотрением отдельного примера.

На рис. 210 показана схема приспособления для растачивания отверстий в корпусах. Приспособление состоит из плиты *1*, на которую монтируются кронштейны *4* и *6*, предназначенные для установки борштанг *2*, *3* и *7*. На борштангах устанавливают

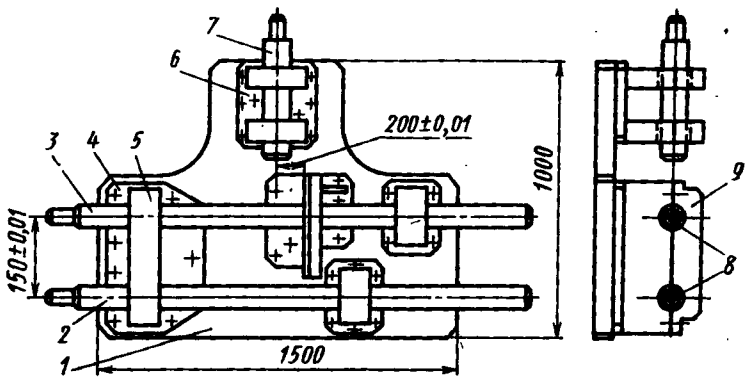


Рис. 210. Схема приспособления для растачивания отверстий в корпусах

резцы или специальные резцовые головки для растачивания отверстий в обрабатываемых деталях.

При изготовлении приспособления должны соблюдаться следующие технические условия:

а) между осями борштанг *2* и *3* должно соблюдаться межцентровое расстояние с точностью 0,01 мм;

б) отверстия всех поддерживающих борштанги кронштейнов должны быть строго соосными;

в) оси отверстий для борштанг должны быть строго перпендикулярны базовой плоскости;

г) непараллельность оси борштанги *7* к базовой плоскости не должна превышать 0,01 мм на всей длине.

Плиту *1* изготовляют из стального листа путем вырезки по ранее размеченному контуру. Плоскости плиты по контуру обрабатывают на горизонтально-расточном станке с установкой на угольнике. Валы борштанг изготовляют из стального проката на токарно-винторезном станке с зацентровкой их с двух сторон. После точения размечают пазы для установки резцов, обрабатывают их на радиально-сверлильном станке, затем долбят и опиливают. Затем сверлят и нарезают отверстия для крепления резцов. После предварительной обработки заготовку передают на

термическую обработку, рихтовку и окончательную обработку на круглошлифовальном станке.

Кронштейны состоят из плит *5* и *9*. В плитах имеются отверстия, в которые установлены втулки *8*. Заготовки плит обрабатывают по контуру на вертикально-фрезерном станке, затем в плоскостях разъемов сверлят и нарезают отверстия. Нижние и верхние плиты собирают при помощи болтов и растачивают в них отверстия под втулки на горизонтально-расточном станке. Втулки *8* обрабатывают на токарно-винторезном станке.

Сборка производится в следующей последовательности: на плиту *1* устанавливают кронштейн *4* и закрепляют болтами. Затем через основание кронштейна сверлят и развертывают два конических отверстия и устанавливают фиксирующие штифты, окончательно закрепляющие кронштейн на плите.

В дальнейшем монтируют на плиту *1* остальные кронштейны для установки борштанг, после чего растачивают отверстия во втулках. В отверстия втулок всех кронштейнов устанавливают борштанги. Межцентровое расстояние 150 ± 0,01 выдерживается путем регулировки положения поддерживающих кронштейнов. После этого все кронштейны крепят болтами и стопорят штифтами. Затем устанавливают кронштейн *6*. В отверстия втулок *8* этого кронштейна монтируют борштангу *7*, выдерживая расстояние 200 ± 0,01 мм. Промер осуществляют микрометрическим штихмасом между базовой плоскостью и наружной поверхностью борштанги.

ГЛАВА XXII. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРУЖИН

Наиболее распространенными в турбиностроении являются винтовые цилиндрические пружины, которые по характеру работы разделяют на пружины сжатия, пружины растяжения, пружины, работающие на кручение, и специальные пружины, воспринимающие комбинированную нагрузку.

Для изготовления пружин, в зависимости от условий их работы, применяют углеродистые, марганцовистые, кремнистые, хромомарганцовистые, хромокремнистые и другие пружинные стали. Химический состав и механические свойства качественных пружинных сталей приведены в соответствующих ГОСТах. Пружинный прокат и проволока из сталей, указанных в этих стандартах, применяются для пружин, которые могут работать в интервале температур от —50 до +400° С, в зависимости от марки. Следует стремиться к сокращению количества применяемых марок сталей, так как большое количество марок значительно усложняет организацию снабжения завода.

До диаметра 10 мм пружины обычно навивают без подогрева, а свыше — с подогревом. Навивка пружин производится на

токарно-винторезных станках с применением оправок определенного диаметра. Точный размер оправки в каждом случае следует устанавливать опытным путем.

В технологический процесс горячей навивки круглых пружин входят следующие операции: отрезка заготовки требуемой длины; нагрев заготовки; оттяжка или вальцовка концов заготовки; нагрев заготовки; навивка пружины; обрубка концов пружины; разводка и правка пружины; заточка и шлифование торцов пружины; термическая обработка; испытание и контроль размеров.

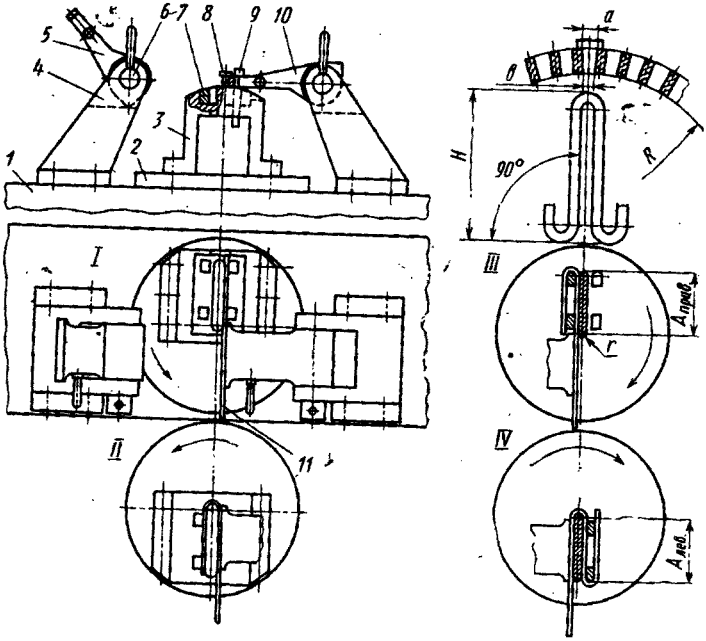


Рис. 211. Схема установки для навивки зигзагообразных пружин

Плоские пружины в турбиностроении применяются в уплотнениях (см. рис. 193). Заготовкой для плоских пружин является лента. Пружины штампуют на прессе, затем в них скругляют острые кромки на галтовочном барабане или другим путем. Пружины проходят испытание согласно техническим условиям. Изготовление зигзагообразных пружин гибких муфт (см. рис. 132, *в*) требует применения специальных приспособлений для навивки и термической обработки.

Чтобы обеспечить одновременную работу всех витков пружины для равномерного распределения по ним нагрузки от крутящего момента, к изготовлению пружин предъявляют высокие требования по точности.

Навивка пружин может производиться на токарных или карусельных станках. Однако, для того чтобы обеспечить высокое качество пружин, целесообразно иметь для их навивки специальное оборудование и устройство, схема которого показана на рис. 211. На станине *1* смонтирован поворотный стол *2*, который имеет правое и левое вращение. Привод стола состоит из электродвигателя, червячного редуктора и фрикционной муфты, необходимой для остановки стола при подходе навиваемого витка до упора.

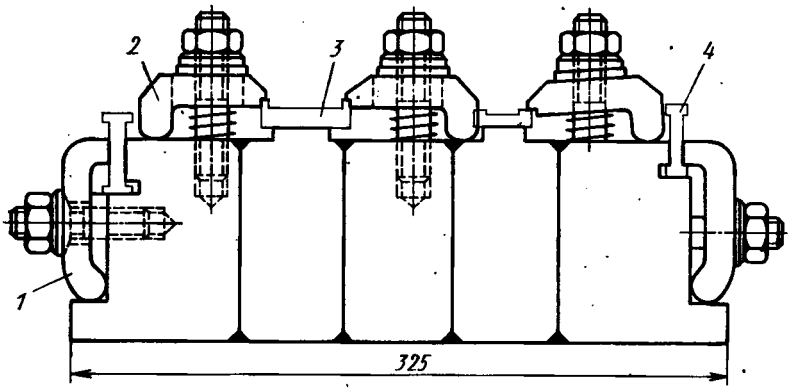


Рис. 212. Схема приспособления для строгания заготовок зигзагообразных пружин

На столе монтируется приспособление *3*, в котором закрепляется пластина *7* с грибком *8* и клиньями *9*. Пластина *7* с комплектом указанных деталей является сменной для разных по размерам пружин. Упоры *5* и *10*, смонтированные в кронштейнах *4* на эксцентриковых валиках *6*, создают возможность поджимания заготовки *11* к грибку *8*. Процесс навивки осуществляется в порядке положений *I*, *II*, *III*, *IV*.

Нагретая заготовка подводится к грибку *8* и поджимается к нему клиньями *9* и упором *10*. Поворотом стола до положения *II* производится образование первого витка. Плотность прижатия заготовки к грибку *8* с требуемым усилием достигается за счет настройки фрикционной муфты привода. Затем упор *10* отбрасывается, клинья выбиваются и заготовка снимается с грибка. Стол возвращается в исходное положение. Производится нагрев следующего участка заготовки, после чего она вновь устанавливается на приспособление (положение *III*) и закрепляется клиньями *9* и упором *5*. Столу сообщают движение с поворотом его в положение *IV*. Происходит образование второго витка. Для образования следующих витков процесс повторяют в том же порядке.

При изготовлении приспособления необходимо выполнять следующие требования: точно выполнить размеры *a* и *b* у грибка для обеспечения расположения витков по радиусу *R*; точно выдержать размеры $A_{прав}$ и $A_{лев}$ от центра вращения стола до края окна под клинья *9*. Эти два размера должны быть равны, иначе витки не будут перпендикулярны плоскости поверочной плиты, так как клинья не только поджимают заготовку к грибку *8*, но и определяют высоту витков *H*.

В производственных условиях зачастую возникает необходимость предварительной механической обработки заготовок для пружин гибких муфт. Такая обработка осуществляется на продольно-строгальном станке в специальном приспособлении (рис. 212). В нем можно обрабатывать одновременно по две полоеы *3* и по две полосы *4*. Полосы *3* крепят прижимами *2* и строгают их верхнюю поверхность. При обработке для выдерживания требуемой ширины полос их крепят к боковым гнездам приспособления прижимами *1*.

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

СБОРКА И ИСПЫТАНИЕ ТУРБИН НА ЗАВОДЕ

Глава XXIII. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ МАШИН

1. Основные понятия и определения

Технологическим процессом сборки машин называют совокупность операций по соединению отдельных деталей и сборочных единиц изделия, координации и фиксации их между собой, выполняемых в определенной последовательности и с определенной точностью, с целью получения готовой машины, механизма или отдельной сборной единицы (например, корпуса цилиндра турбины), полностью отвечающих техническим требованиям, установленным в конструкторской документации в соответствии с их служебным назначением.

Понятия — изделие, деталь, сборочная единица — определяются ГОСТ 2.101—68. Кроме них в специальной литературе по технологии машиностроения часто пользуются терминами «технологический узел», или просто «узел». Этими терминами определяют части изделия или любой его сборочной единицы, состоящие из двух и более деталей, соединяемых между собой независимо от других частей машины с целью установления наиболее рациональной технологии сборки машин или обработки ее элементов.

Первоначально из отдельных деталей собирают менее сложные сборочные узлы, потом из отдельных деталей и ранее собранных узлов собирают более сложные узлы, механизмы или сборочные единицы, а затем и машину в целом.

Сборка любой машины (соответственно и турбины) подразделяется на общую и узловую. Под общей сборкой понимается сборка всей турбины под испытание, а под узловой — сборка ее отдельных узлов. При построении технологического процесса сборки машины различают узлы первого, второго порядка и т. д. Узлом первого порядка называют узел, непосредственно входящий в машину; узлом второго порядка — узел, непосредственно входящий в узел первого порядка; узлом третьего порядка — узел, входящий в узел второго порядка, и т. д. Например, ротор турбины является узлом первого порядка, так как он непосредственно входит в турбину, а рабочие колеса,

собираемые до сборки всей турбины с валом и образующие вместе с ним ротор турбины, будут узлами второго порядка; соответственно сварные пакеты лопаток (см. рис. 17), набираемые на диск, будут узлами третьего порядка.

Понятия «деталь» и «узел» в производственной практике являются несколько условными. Так, например, для лопаточного цеха сварной пакет лопаток будет узлом, а для цеха, производящего облопачивание,— деталью. Для котельно-сварочного цеха сварной корпус турбины, выпускаемый этим цехом в виде сварной заготовки, будет узлом, а для механического цеха, производящего механическую обработку сваренного корпуса,— деталью.

Такие наименования узлов и подузлов, встречающиеся в технической литературе по общему машиностроению, как группа, подгруппа, комплект, подкомплект и др. не привились в практике стационарного турбиностроения.

В каждой сборочной единице имеется часть, с которой должна начинаться сборка. Такой частью может быть или деталь, или узел. Их называют базовыми или базирующими, так как они определяют положение всех остальных деталей и узлов данной сборочной единицы. Обычно роль базирующих элементов выполняют рамы, основания, корпусы; в узлах, представляющих собой тела вращения,— оси и валы. Например, в роторе турбины базирующей деталью является вал.

Деление машины на сборочные единицы и технологические узлы имеет большое значение для рациональной организации сборочных работ. Поэтому можно сказать, что правильная организация сборочных работ зарождается уже на чертежном столе конструктора.

При расчленении конструкции турбины на отдельные сборочные единицы руководствуются следующими общими положениями: 1) выделение той или иной группы деталей в особую сборочную единицу должно быть возможным и целесообразным как в конструктивном, так и в технологическом отношении; 2) на общую сборку машины следует подавать возможно меньшее количество отдельных деталей; 3) общая сборка должна быть максимально разгружена от мелких сборочных и других вспомогательных работ; 4) выделение сборочных единиц должно обеспечивать их правильную сборку и, по возможности, испытание до общей сборки турбины.

Работы по организации производства, его подготовке, планированию и учету могут быть значительно облегчены, если наряду со спецификациями будет разработана схема комплектации машин.

В качестве примера на рис. 213 показана схема комплектации относительно простого агрегата — турбоциркуляционного насоса. Такая схема дает наглядное представление о составе данной сборки.

Кроме схем комплектации, целесообразно разрабатывать схемы сборки отдельных узлов, сборочных единиц и машин в целом.

Для примера на рис. 214 показан чертеж быстрозапорного клапана, а на рис. 215 — схема его сборки. Детали, узлы и подузлы клапана занимают в схеме сборки определенное место, обозначенное прямоугольником, разделенным на три клетки. В первой указан номер позиции детали по чертежу; во второй — количество данных деталей в узле и в третьей — наименование детали. На схеме выделены базовые детали. Для

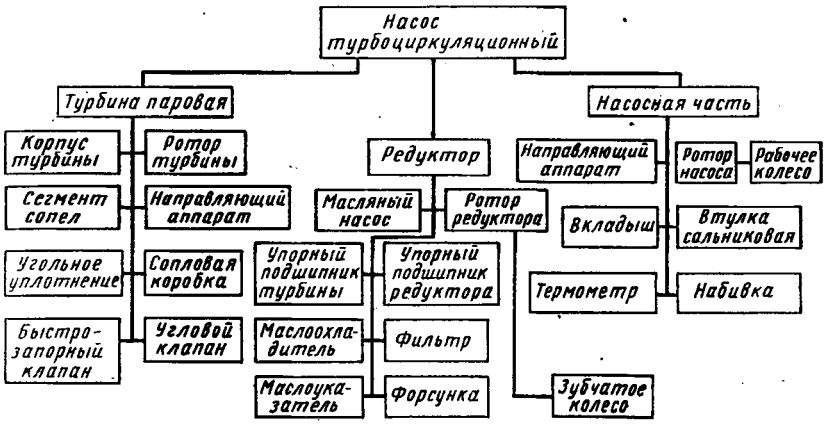


Рис. 213. Схема комплектации сборочной единицы

самого клапана это будет корпус (поз. *1*); для подузла 1-го порядка — крышка (поз. *15*); для подузлов 2-го порядка — шток (поз. *6*) и колонка (поз. *18*); для подузла 3-го порядка — клапан (поз. *4*).

Согласно схемам сборки составляют цикловой график сборки агрегата, в котором учитывается длительность выполнения всех сборочных операций. Пример построения циклового графика сборки показан в табл. 30. Исходя из циклового графика и графиков механической обработки деталей, определяют время запуска деталей в производство. Для обеспечения бесперебойной и ритмичной работы завода планово-диспетчерские отделы планируют порядок изготовления деталей и выполнения сборочных работ в соответствии с цикловыми графиками.

Весь объем работ по сборке турбины, пользуясь схемой сборки и цикловым графиком, можно разделить на последовательные и параллельные работы. Из циклового графика ясно видно, какие работы могут выполняться параллельно, а какие только последовательно. Для общей сборки турбины цикловой

график растянут на срок от 3 до 4-х месяцев в соответствии с общей продолжительностью узловой и общей сборки турбины. При столь продолжительном цикле сборки наличие детально разработанного циклового графика является особенно необходимым для правильной организации и планирования всех работ

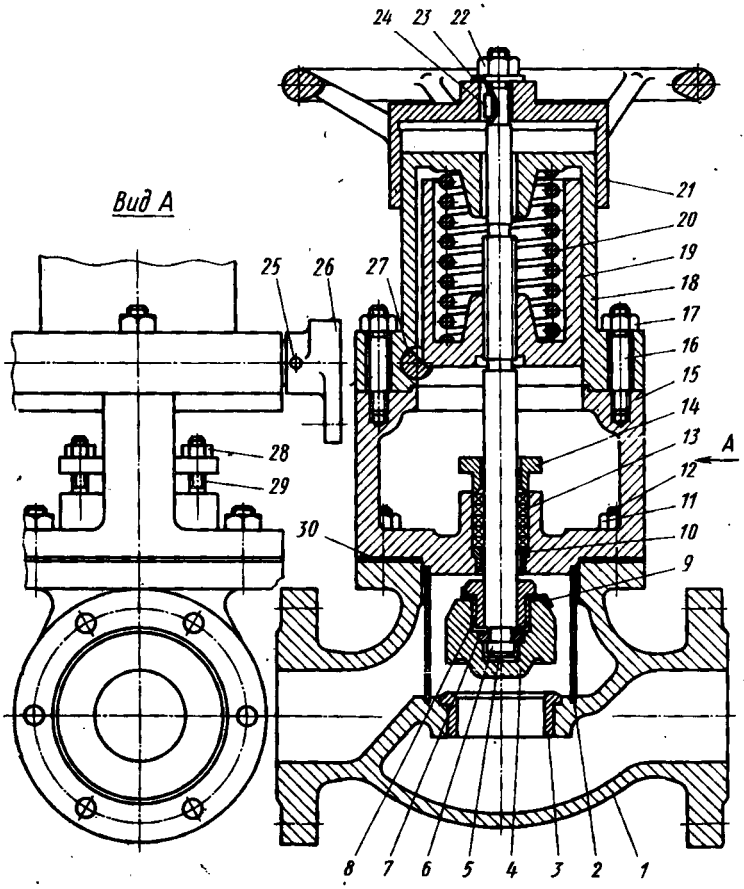


Рис. 214. Быстрозапорный клапан

по производству турбины, так как изготовление всех ее деталей и сборочных единиц должно вестись согласованно с ходом технологического процесса сборки турбины.

График охватывает подготовительные и основные слесарно-сборочные работы. Вместе с тем, чтобы точнее определить срок отправки турбин с завода, целесообразно включать в цикловые графики также и работы по стендовым испытаниям, ревизии после испытаний, работы по устранению обнаруженных при испытаниях дефектов, окраске, консервации и передаче деталей

турбины на склад для упаковки и отправки ее к заказчику на место установки.

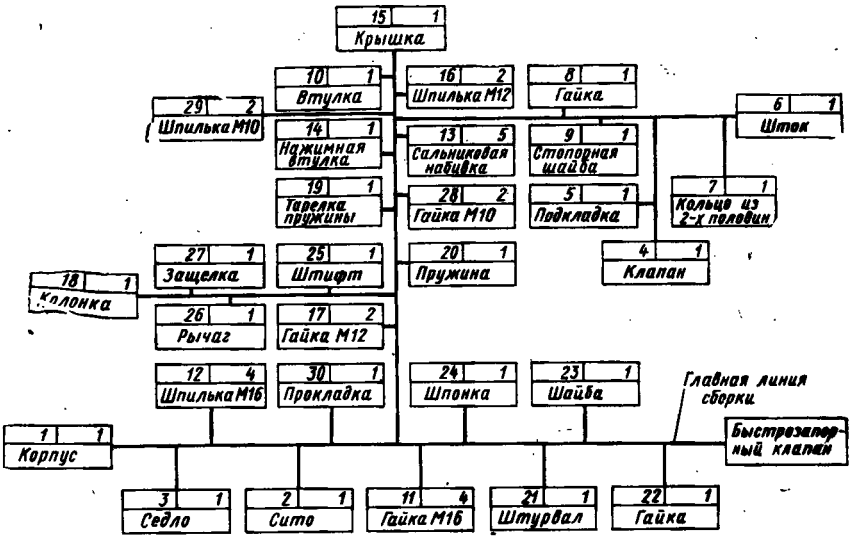


Рис. 215. Схема сборки быстрозапорного клапана

2. Технологичность конструкции в отношении сборки

Работая над созданием машины или отдельных ее механизмов, разрабатывая чертежи деталей и сборочных единиц, конструктор должен обязательно учитывать необходимость использования наиболее рациональных процессов как при изготовлении деталей, так и при сборке их в сборочные единицы.

Деталь с точки зрения сборки будет технологичной, если она проста и не требует пригонки; при крупных габаритах и большом весе деталь должна иметь необходимые транспортные отверстия, цапфы, проушины и другие специальные устройства, позволяющие захватить деталь подъемными средствами и выверить ее в необходимом положении в процессе сборки.

Сборочная единица может считаться достаточно технологичной, если она имеет минимальное количество деталей, проста в сборке, не требует взаимной пригонки деталей и сложной регулировки. При невозможности избежать пригонки деталей в процессе сборки следует стремиться к тому, чтобы пригоняемые поверхности были наименьшими и не имели ступеней, осложняющих возможность применения шлифования их вместо ручной обработки.

Важным требованием к конструкции машины или отдельных ее механизмов, с точки зрения качества сборки, является

Таблица 30

График сборки турбоциркуляционного насоса

Наименование работ	Продолжительность работ в единицах времени																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Сборка корпусов турбины, насоса и редуктора																	
Сборка ротора турбины, включая облопачивание																	
Сборка ротора редуктора																	
Сборка ротора насоса																	
Центрирование роторов насоса и редуктора																	
Сборка направляющего аппарата турбины																	
Сборка угольного уплотнения																	
Сборка сопловой коробки																	
Сборка быстрозапорного клапана																	
Сборка углового клапана																	
Сборка масляного насоса																	
Сборка упорных подшипников																	
Сборка маслоохладителя																	
Сборка прочих узлов редуктора																	
Сборка турбины и редуктора																	
Сборка насоса																	
Сборка перепускного и других клапанов																	
Сборка паро- и маслопроводов																	
Подготовка агрегата к испытанию и испытание																	
Подготовка агрегата к ревизии и ревизия																	
Устранение дефектов по акту ревизии																	
Сборка агрегата после устранения дефектов																	
Консервация, упаковка, отправка																	

наличие удобных сборочных баз, простота процессов сборки и разборки и минимальный объем пригоночных работ.

Для обеспечения высокой технологичности конструкций сборочных единиц необходимо соблюдение следующих основных требований к ним:

а) в отдельной сборочной единице должно применяться наименьшее количество деталей, что достигается выбором наиболее простой и рациональной ее конструктивной схемы и объединением ряда деталей в одну;

б) четкая разбивка изделия на самостоятельные сборочные единицы должна допускать их независимую сборку, контроль и испытание;

в) должна обеспечиваться беспригоночная собираемость и экономически обоснованный уровень взаимозаменяемости деталей и сборочных единиц, что достигается в результате тщательного учета всех особенностей сборочных процессов при конструировании изделия, хорошей увязки размеров деталей и допусков к ним, назначения действительно требуемой точности и чистоты обработки поверхности деталей. Излишняя точность размеров и чистота обработки поверхностей деталей удорожают изделие, не улучшая его эксплуатационных качеств, а недостаточно высокий уровень их нарушает принцип взаимозаменяемости деталей, ухудшает условия сборки и эксплуатации изделий. Надо очень тонко оценивать все технические требования к собираемым в сборочные единицы деталям, чтобы обеспечивать применение наиболее целесообразных процессов их сборки и высокие эксплуатационные свойства.

Сборка основана на разных методах решения размерных цепей.

Таких методов существует пять: 1) метод полной взаимозаменяемости; 2) метод неполной взаимозаменяемости; 3) метод селекции; 4) метод доводки или изготовления деталей по месту; 5) метод компенсаторов. Применение тех или иных методов сборки или их сочетаний должно оправдываться технико-экономическими соображениями производства или выгодами эксплуатации [3 и 11]. В турбинном производстве, как производстве единичном или мелкосерийном, применяются в основном 4-й и 5-й методы. При их использовании все детали изготовляются в пределах достижимой экономической степени точности; точная сборка и правильное решение размерных цепей достигаются за счет компенсирующих раздвижных звеньев или звеньев, имеющих припуски на пригонку, которые снимаются по замерам, сделанным с места.

Полная взаимозаменяемость в турбинном производстве возможна и необходима при изготовлении хвостов лопаток и пазов под лопатки в дисках, посадочных мест уплотнений, быстро изнашивающихся деталей регулирования и других наиболе часто заменяемых деталей.

При подборе заклепок для крепления лопаток с вильчатым хвостом на дисках применяется метод селекции. Все заклепки шлифуются на бесцентрово-шлифовальном станке и при постановке на место сортируются по группам. Необходимая для качественного заклепочного соединения напряженная посадка заклепок достигается путем развертывания отверстий под заклепки каждой группы разверткой соответствующего размера.

3. Слесарные и пригоночные операции

Подготовка деталей к сборке является важнейшей частью технологического процесса сборки, обеспечивающей высокое качество собираемых изделий. Сюда относятся собственно подготовительные работы и слесарно-пригоночные операции.

Основными подготовительными работами перед сборкой являются: мойка, очистка деталей от следов охлаждающей жидкости, масла, антикоррозионной смазки, стружек, опилок и других загрязнений.

В турбиностроении с единичным характером производства и использованием особо крупногабаритных деталей обычно применяют ручную очистку. В качестве оборудования для промывки мелких деталей используют баки и противни с необходимым комплектом кистей и щеток. Крупные детали протирают ветошью.

В качестве промывочных жидкостей применяют в основном керосин и бензин. Применение бензина строго ограничено ввиду его высокой огнеопасности. При сборке особо точных приборов и узлов регулирования для промывки деталей применяют спирт.

Слесарно-пригоночные работы предшествуют или сопутствуют выполнению непосредственно сборочных операций. Основными видами слесарно-пригоночных работ являются обрубка, опиливание, шабрение, притирка, доводка, зачистка, правка, сверление, развертывание и нарезание отверстий по месту в сборе с другими деталями и др.

В тяжелом машиностроении для достижения высокой точности сборки все еще широко используются пригоночные работы. Детали машин при соединении их в узлы и механизмы должны сохранять определенное взаимное расположение и повороты в пределах заданной точности, что зачастую не вполне обеспечивается в тяжелом машиностроении механической обработкой деталей. При пригонке устраняются погрешности механической обработки и обеспечивается требуемый характер соединений. В одних случаях следует обеспечить зазор между деталями, а в других, наоборот, необходим натяг, обеспечивающий прочность или плотность данного соединения, в зависимости от конкретных требований к нему.

Величины припусков на доводку деталей при сборке определяются требованиями технологии сборки. Припуски остав-

ляются в основном на деталях, замыкающих размерные цепи. Ясно, что чем больше объем пригоночных работ, тем больше затрачивается времени на сборку, поэтому необходимо изыскивать все возможности для снижения количества пригоночных работ и их механизации.

4. Пути повышения производительности сборки

Одним из основных путей уменьшения объема слесарных и слесарно-пригоночных операций, а вместе с тем сокращения трудоемкости и повышения производительности сборочных работ, является совершенствование технологии механической обработки и повышение качества изготовления деталей. Так, например, внедрение шлифования плоскостей разъема цилиндров турбины, шабрящего фрезерования и других тонких методов чистовой обработки плоскостей позволяет почти полностью исключить ручную слесарную пригонку деталей в процессе сборки машин. Большое значение имеет правильное крепление частей корпуса при механической обработке, исключающее пережимы детали, вызывающие упругие деформации. Упругие деформации, допущеные при креплении детали под обработку, приводят к перекосам поверхностей детали после ее открепления. Образование перекосов можно предупредить применением правильно построенных зажимных приспособлений и устройств.

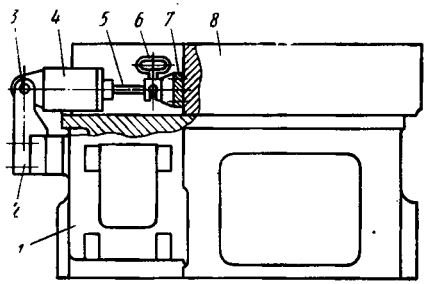


Рис. 216. Пневмоцилиндр для перемещения тяжелых деталей в процессе доводки их поверхностей

Снижение трудоемкости сборки достигается также механизацией слесарных пригоночных и сборочных операций, т. е. применением механизированных инструментов — шаберов, напильников, зубил, пневматических и электрических шлифовальных и сверлильных машинок, отверток, гайковертов и других инструментов. Наряду с этим большой эффект может быть получен путем создания специальных средств механизации сборочных работ силами самого завода, цеха или даже участка. Примером может служить пневмоцилиндр (рис. 216), предназначенный для перемещения одной тяжелой корпусной детали по другой при проверке качества сопряжения поверхностей этих деталей по краске. С применением пневмоцилиндра тяжелая и трудоемкая ручная работа заменяется механической, выполняется легко и быстро.

Пневмоцилиндр *4* с помощью кронштейна *2* и вала *3* закрепляется на обрабатываемой детали *1*, у которой производится пригонка поверхности разъема. Шток пневмоцилиндра *5* снабжается крючком для захвата за скобу *7*, укрепленную на эталонной детали *8*, по которой производится проверка качества и пригонки поверхности детали *1* по краске. При включении пневмоцилиндра эталонная деталь, на разъем которой нанесен тонкий слой краски, перемещается по обрабатываемой поверхности детали *1*, окрашивая вершины неровностей, подлежащих сшабриванию с ее поверхности, следами краски. По окончании окрашивания цилиндр может быть поднят за ручку *6* и откинут в нерабочее положение поворотом вокруг вала *3*.

Сборка турбин, части которых, как правило, являются весьма тяжелыми, не может производиться без применения подъемных механизмов и приспособлений. Наличие достаточного количества транспортно-подъемных средств, сборочных приспособлений и крепежных деталей обеспечивают лучшие условия для бесперебойной, высокопроизводительной работы сборщиков.

5. Организация сборки турбин

Технология производства тесно связана с его масштабами, а также с конструкцией и размерами выпускаемых изделий. Это определяет и организацию сборочных работ. В зависимости от размеров и количества выпускаемых изделий в современном машиностроении применяются стационарный и подвижный методы сборки.

При сборке турбин применяется стационарный метод. Этот метод сборки характерен тем, что собираемое изделие (или узел) остается в продолжении всего цикла сборки на одном рабочем месте, к которому доставляются все необходимые при сборке материалы, детали, узлы, сборочные единицы, а также инструменты и приспособления.

Сборка отдельных узлов турбин начинается еще в процессе механической обработки (промежуточная сборка), поэтому некоторые виды работ, по своему характеру являющиеся сборочными, выполняются другими цехами, например цехом обработки крупных деталей при сборке цилиндров турбины под растачивание. С другой стороны, некоторые работы, не являясь в прямом смысле сборочными, зачастую выполняются в сборочных цехах. К таким работам относятся гидравлические испытания цилиндров после сборки их по вертикальным разъемам для проверки плотности соединения, а также испытания для проверки клапанов паровых коробок на плотность; шпаклевка, окраска и консервация деталей перед отправкой заказчику и другие работы.

6. Оборудование сборочного цеха

Для обеспечения качества и производительности процесса сборки необходимо хорошо подготовить на рабочих местах специальное оборудование, приспособления и инструменты и доставить сюда требуемый комплект узлов и деталей турбины.

Сборочный цех должен быть оборудован стендом (рис. 217), на котором производится окончательная сборка турбины под испытание. Стенд состоит из отдельных чугунных плит, соединенных между собой болтами. На стенде должен иметься комплект чугунных или стальных блоков разной величины, на которых производится монтаж турбины, и комплект транспортно-подъемных приспособлений, предназначенных для перемещения и подъема отдельных частей турбины при их центровке и установке на место. Такими приспособлениями являются различные клиновые подъемники, с винтами и без них; специальные гидравлические подъемные приспособления, которые слегка приподнимают перемещаемую часть турбины, а затем передвигают ее в требуемом направлении в горизонтальной плоскости. Для вертикального подъема широкое распространение получили клиновые и винтовые домкраты. Комплект наиболее часто применяемых цеховых сборочных универсальных приспособлений показан на рис. 218. Кроме того, для сборки турбин требуется подъемно-транспортное оборудование — мостовые краны, стрелы и другие устройства.

7. Основы разработки технологического процесса сборки

В основе проектирования технологического процесса сборки турбин лежит принцип обеспечения всех требований к качеству турбин, указанных в сборочных чертежах и технических условиях, при использовании наиболее экономичных и производительных методов и средств сборки.

Разработка технологического процесса сборки должна начинаться с тщательного изучения конструкции деталей и сборочных единиц, технических условий для их изготовления и сборки. При этом необходимо произвести технологический анализ допусков и посадок с учетом связи деталей в системе сборочных единиц и турбины в целом. Технологический процесс сборки записывается на специальных технологических картах, формы которых в качестве примера показаны в приложении 4.

Весь технологический процесс сборки машин разделяется на операции, каждая из которых представляет собой законченную часть технологического процесса и может выполняться самостоятельно независимо от других работ (например, мойка, очистка, пригонка, центровка, установка болтов и затяжка гаек и т. д.). Операции различают по виду работ и по сложности выполнения. Соответственно при заполнении карт технологиче-

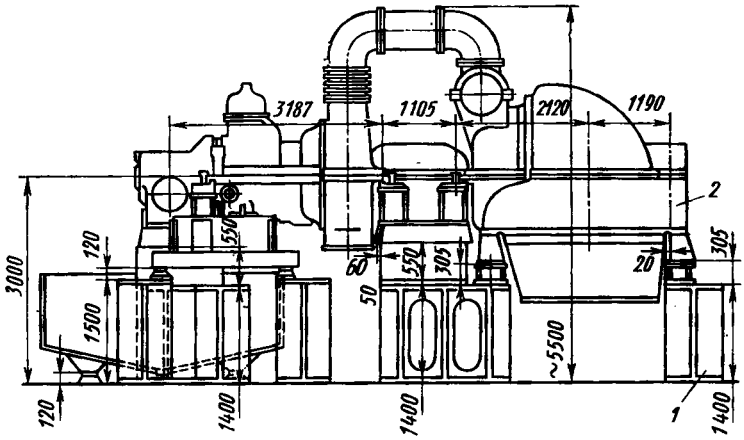


Рис. 217. Схема установки блоков на стенде для сборки турбины:
1 — блок; *2* — турбина

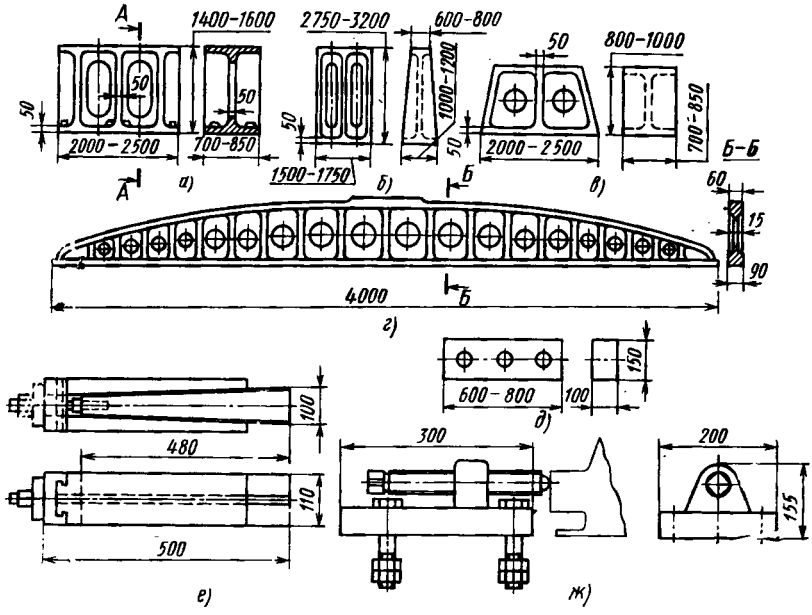


Рис. 218. Универсальные приспособления для сборочных работ:
а, б, в — чугунные блоки различных размеров и формы; *г* — монтажная линейка; *д* — призма; *е* — клиновой домкрат; *ж* — винтовой упор

ского процесса сборки в них указывается профессия и квалификация (разряд работы) исполнителя.

Разделение процесса сборки на операции позволяет установить последовательность выполнения работ; точнее определить потребность в нормальных и специальных инструментах и приспособлениях, необходимых для выполнения каждых отдельных работ, и своевременно подготовить их; определить время, необходимое для выполнения каждой отдельной операции и общей сборки всего изделия; определить потребное количество рабочих по специальностям и квалификации; составить график выполнения работ; обеспечить лучшее планирование работ и контроль за их выполнением.

При разработке технологического процесса сборки необходимо исходить не только из формальных требований чертежей конструкции собираемой турбины, но и иметь в виду решение задач, которые конструктор не может, не должен или не в состоянии учесть при разработке чертежей, оставляя их постановку и решение на усмотрение технологов. Так, например, конструктор обязан показать, что ось цилиндра совпадает с его разъемом, однако фактически ось цилиндра может не вполне совпасть с разъемом из-за отклонений, допускаемых при механической обработке. Технолог-сборщик должен предусмотреть в процессе сборки момент проверки совпадения плоскости разъема с осью расточки цилиндра и методы его обеспечения.

В чертежах зазоры диафрагменных и концевых уплотнений могут быть даны концентричными валу. При сборке зазор в нижней части уплотнений должен обычно выполняться больше чертежного, а в верхней — меньше чертежного. Такое несимметричное распределение зазоров необходимо делать исходя из условий естественного прогиба вала и прогрева цилиндра во время работы турбины, когда произойдет их выравнивание.

На чертежах ось ротора указывается прямой линией. В действительности ось имеет изогнутую форму в зависимости от веса, длины и жесткости ротора. Кроме того, жесткость ротора при работе от нагрева меняется. Указанные причины влияют на методы центровки.

Наметив последовательность общей сборки машины, следует проверить возможность осуществления ее в реальных условиях, учитывая формы, габариты и вес всех сборочных единиц и деталей. При необходимости следует заранее обеспечить сборку теми или иными специальными приспособлениями. Например, для установки ротора в вертикальное положение требуется изготовление комплекса подъемных и кантовочных приспособлений и внесение в технологический процесс ряда дополнительных операций, относящихся к закреплению на роторе подъемных приспособлений и осуществлению кантовки ротора с учетом требований техники безопасности.

Необходимо предусматривать также максимальную механизацию выполнения сборочных операций.

Рациональность разработанного технологического процесса при серийной сборке определяют относительным показателем — коэффициентом трудоемкости сборочного процесса φ. Величина этого показателя определяется из формулы

$$\varphi = \frac{T_{сб}}{T_м},$$

где $T_{сб}$ — расчетная трудоемкость сборки узла;

$T_м$ — трудоемкость обработки всех деталей узла или изделия.

Чем меньше φ, тем более совершенны технологические процессы сборки (для различных производств $\varphi = 0{,}1 \div 0{,}4$).

Глава XXIV. ОБЩАЯ СБОРКА ТУРБИН

1. Задачи общей сборки турбины и предъявляемые к ней требования

Общая сборка турбин заключается в установке и пригонке друг к другу деталей и узлов турбины, предварительно собранных в процессе промежуточной и узловой сборки. Общая сборка разбивается на четыре основных этапа: 1) центровка корпусов турбины; 2) пригонка и центровка отдельных деталей корпуса (обойм, диафрагм, вкладышей, уплотнений и т. п.); 3) сборка корпусов с роторами, узлами регулирования и закрытие турбины; 4) сборка стендовых трубопроводов (пара, масла) и подсоединение их к турбине; подготовка турбины под испытание.

Сборка любой турбины, а тем более мощной многоцилиндровой паровой турбины или сложной газотурбинной установки, должна обеспечить правильную центровку и точное взаимное расположение отдельных элементов турбины (в первую очередь корпусов и роторов) между собой и относительно продольной и поперечной осей агрегата; плавность общей линии осей всех роторов одновального агрегата без излома и «коленчатости»; возможность повторения заводской сборки при монтаже турбины на месте ее работы по формулярам завода без дополнительных пригоночных работ.

Наиболее ответственными операциями общей сборки турбин являются подготовка деталей к сборке, центровка корпусов и роторов турбин, центровка обойм и диафрагм, сборка подшипников, сборка статора с ротором и др. Эти операции по своему содержанию и требованиям к их выполнению в основном идентичны как для паровых, так и для газовых турбин. Наибольший опыт накоплен в производстве паровых турбин, поэтому,

чтобы избежать повторений, все описываемые операции рассматриваются применительно к паровым турбинам. По мере надобности отмечаются только некоторые отличительные особенности выполнения соответствующих работ на сборке газовых турбин.

Общая сборка на испытательном стенде является одновременно и сборкой турбины под испытание. Это требует особой тщательности проведения работ с выполнением всех предъявляемых к сборке турбин технических требований для избежания разборок и переборок отдельных элементов турбины в процессе их испытания и наладки.

Для сокращения времени нахождения турбины на стенде, а следовательно, и времени его загрузки, желательно до общей сборки турбины на испытательном стенде выполнить максимум сборочных и пригоночных работ вне стенда.

Желательно также не допускать выполнения на испытательном стенде работ, связанных со снятием стружки (сверления, подрубки и т. п.), или ограничить их лишь самыми необходимыми. Все пригоночные работы, связанные со снятием стружки, нужно выполнять до сборки турбины на испытательном стенде. Если такие работы на стенде окажутся неизбежными, стружку следует тщательно удалять во избежание попадания ее при испытании между неподвижными и вращающимися деталями турбины, что неминуемо приведет к порче деталей турбины или даже к серьезной аварии.

2. Конструкция стендов для сборки и испытания турбин

Испытательный стенд должен представлять собой фундаментальное сооружение, достаточно жесткое и прочное, способное выдерживать не только статические нагрузки (массу турбины), но и динамические, могущие возникать при испытании турбины вследствие вибрации из-за недостаточно высокого качества динамической балансировки роторов или других причин.

Площадь стенда является частью сборочного цеха и должна быть достаточной для возможности одновременной сборки и испытания нескольких турбин в соответствии с программой цеха.

Стенд (рис. 219) должен иметь массивную железобетонную подушку, устланную фундаментными плитами, на которые по разметке, согласно установочному чертежу турбины, ставят чугунные и стальные блоки, надежно скрепленные болтами между собой и прикрепленные к фундаментным плитам стенда.

Вспомогательное оборудование стенда, состоящее из конденсатора, эжекторов, маслоохладителей, циркуляционных и конденсатных насосов, паропроводов, сепараторов и пр., расположено рядом со сборочным цехом. Все эти устройства являются постоянным оборудованием стенда. Турбины проходят испыта-

ние без своих вспомогательных агрегатов, которые заменяются оборудованием стенда. При большом количестве выпускаемых однотипных турбин целесообразно на стенде иметь особые гнезда для установки всех выпускаемых заводом типов турбин. Это сокращает время для подготовки стенда к сборке и испытанию следующей турбины. Для удобства обслуживания при испытании и сборке турбины, по периметру каждого гнезда стенда

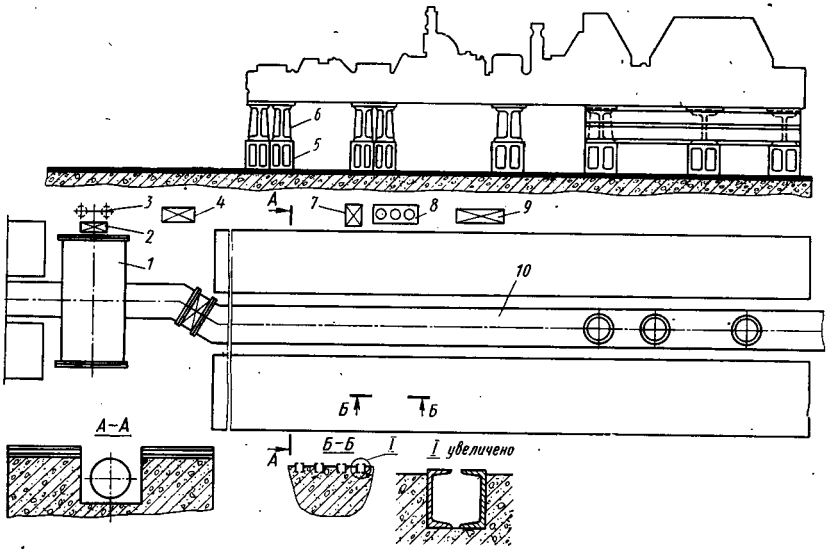


Рис. 219. Схема расположения основной части сборочного стенда

1 — конденсатор; *2* — конденсатный насос; *3* — эжектор; *4* — бак негорючей жидкости; *5* — сборные блоки; *6* — стойки; *7* — масляный насос; *8* — маслоохладители; *9* — масляный бак; *10* — трубопроводы отработавшего пара

устанавливают легкие металлические сварные колонны, на которых на уровне пола машины собирают настил из рифленого листового железа с перилами.

3. Подготовка стенда к сборке турбины

В работе по подготовке стенда для сборки турбины включаются: подготовка блоков стенда и выверка фундаментных рам турбины; проверка и пригонка рам к опорным поверхностям цилиндра и корпусов подшипников и проверка пригонки направляющих шпонок. Перед центровкой турбины обязательно надо проверить совпадение осей расточек корпусов с плоскостью разъемов частей корпуса турбины. Величины фактических отклонений необходимо клеймить на разъемах в определенных местах.

В зависимости от организации работ фундаментные рамы и шпонки могут поступать на общую сборку без пригонки

к корпусам цилиндров и подшипников. В таком случае сборка турбины начинается с пригонки шпонок и опорных поверхностей фундаментных рам.

Пригонка фундаментных рам должна выполняться весьма тщательно. Плотность прилегания опорных поверхностей фундаментных рам к соответствующим опорным поверхностям корпусов подшипников и лап цилиндров достигается в результате припиловки и шабровки. Шабровку можно считать законченной, когда пятна краски будут равномерно распределены по всей поверхности рамы, не менее одного- двух пятен на 1 см^2, и в стыке нигде не будет проходить щуп толщиной 0,05 мм. Особо тщательно проводят пригонку рам подшипников. У переднего подшипника требуется обеспечить не только плотное прилегание сопрягаемых поверхностей, но и отсутствие отклонений от правильной плоскости. Корпус переднего подшипника сдвигается вдоль рамы при тепловом расширении турбины, и наличие кривизны на поверхностях прилегания может привести к расцентровке турбины.

Если фундаментные рамы достаточно жесткие по своей конструкции, целесообразно начать пригонку с поверхностей рам, а затем по рамам пригонять опорные поверхности корпусов турбин. Однако фундаментные рамы по своей конструкции зачастую не имеют достаточной жесткости и легко деформируются при незначительных перекосах. Поэтому во избежание ложных показаний состояния опорных поверхностей целесообразно начинать пригонку плоскостей у жестких деталей, в данном случае у корпусов, а затем по ним пригонять фундаментные рамы. В таком случае для обеспечения лучших условий при шабрении корпус устанавливают опорными плоскостями вверх, а фундаментные рамы, после каждой проверки краской по опорным поверхностям корпуса, перекантовывают.

Характер отклонений осей расточек корпусов по отношению к плоскостям разъемов, показан на рис. 220, *а*. Проверка этих отклонений необходима для обеспечения правильной центровки корпусов. При центровке по уровню оси расточек всех корпусов ЦВД, ЦНД и подшипников должны быть расположены в горизонтальной плоскости. Базой для установки уровня служат горизонтальные разъемы корпусов. Известно, что при обработке цилиндров и корпусов подшипников имеет место несовпадение геометрических осей расточек с плоскостями разъемов цилиндров и подшипников. При установке цилиндров и подшипников по уровню эти отклонения должны учитываться.

Проверку отклонений производят у цилиндров в местах расточек под уплотнения, у корпусов подшипников — в местах расточек под вкладыши или маслозащитные кольца. Соединив болтами нижнюю и верхнюю части корпуса, замеряют диаметры D_1 и D_2 (рис. 220, *б*). Затем снимают верхние части и на нижние в местах расточек *I* и *II* устанавливают призмы и замеряют

размеры B_1 и B_2. Для расточки I отклонение $S_1 = B_1 - \frac{D_1}{2}$, для расточки II отклонение $S_2 = B_2 - \frac{D_2}{2}$ (рис. 220, *в*).

Величины отклонений S больше нуля обозначают знаком плюс, меньше нуля — знаком минус и клеймят на разъеме нижней половины корпусов около тех мест, где проводилась проверка, т. е. у цилиндров около мест расточки под уплотнения и у корпусов подшипников около мест расточек под вкладыши

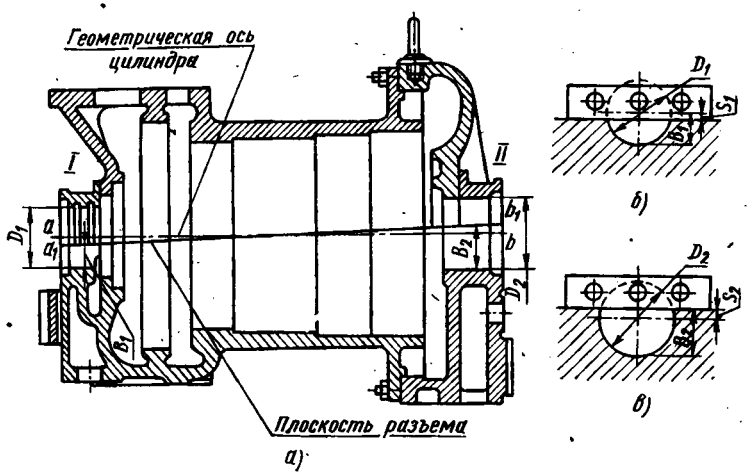


Рис. 220. Схема отклонений плоскости разъема цилиндра a_1b_1 от оси расточки ab

или под маслозащитные кольца. При центровке турбины эти величины записывают в монтажный формуляр и учитывают при подсчете величины центровочных пластин.

4. Центровка корпусов и роторов турбин

Корпусы большинства современных стационарных турбин состоят из нескольких частей. Например, корпусы одноцилиндровых турбин состоят из корпуса турбины и корпусов подшипников. Более крупные турбины имеют несколько цилиндров и роторов, последовательно соединенных между собой, а на электростанции они, кроме того, соединяются с валом генератора.

Центровка турбины имеет целью правильную установку роторов самой турбины и роторов генератора. Положение ротора в турбине зависит от установки цилиндров и подшипников, поэтому работа по центровке роторов связана в первую очередь с правильной установкой цилиндров и корпусов подшипников турбины

Центровка является основной частью процесса общей сборки турбины не только по объему работы, но главным образом по своему значению для надежной и правильной работы турбины в эксплуатации. Неправильное выполнение хотя бы одной из работ, связанной с центровкой, влечет за собой образование целого ряда дефектов в работе турбины на электростанции.

Центровка турбин разделяется на четыре последовательные этапа: центровка по уровню; центровка по струне; центровка по расточкам под уплотнения (по валам); центровка по муфтам.

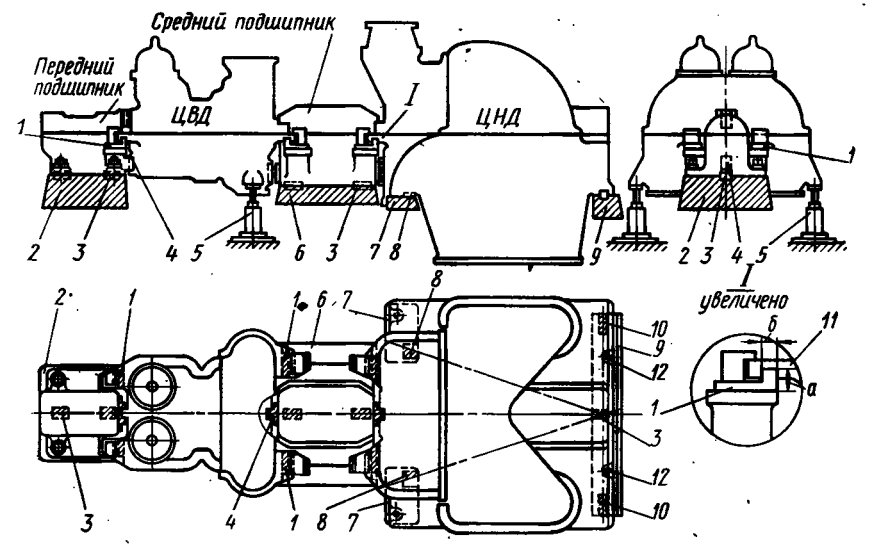


Рис. 221. Схема установки и закрепления турбины:
1 — поперечные шпонки; *2, 6, 7, 9* — фундаментные рамы; *3* — продольные шпонки; *4* — вертикальные шпонки; *5* — пружинные опоры; *8* — косые шпонки; *10* — поперечные шпонки; *11* — лапы цилиндров; *12* — болты крепления

При внедрении оптического метода центровки некоторые из указанных здесь этапов совмещаются.

Центровкой по уровню достигается правильная установка осей расточек цилиндров и корпусов подшипников в одной горизонтальной плоскости. Схема установки цилиндров двухцилиндровой турбины показана на рис. 221. Нижние половины корпусов устанавливаются вдоль оси турбины на блоках стенда на клиновых или винтовых домкратах (см. рис. 218).

Выверка по уровню начинается с цилиндра низкого давления, который берется за базу для установки, а затем к нему последовательно прицентровываются средний подшипник, цилиндр высокого давления и передний подшипник.

Центровку по уровню ведут в следующем порядке (рис. 222). В местах расточек под заднее и переднее уплотнения ЦНД устанавливают призмы *1* и *2* и на них кладут монтажную ли-

нейку (положение *I*). Несовпадение плоскости разъема с осью расточки компенсируется подкладыванием центровочных пластин *9* между призмами и монтажной линейкой.

Проверка горизонтальности ведется по уровню, устанавливаемому на верхнюю площадку линейки. Оперируя клиновыми домкратами и наблюдая за уровнем, добиваются горизонтального положения ЦНД. Затем перемещают линейку в положение *II* на призмы *2* и *5*. Поднимая или опуская на домкратах сначала заднюю часть ЦВД, а затем корпус среднего подшипника, доводят их до горизонтального положения и тем самым добиваются совпадения осей задней расточки ЦВД и корпуса среднего подшипника с осью ЦНД в горизонтальной плоскости.

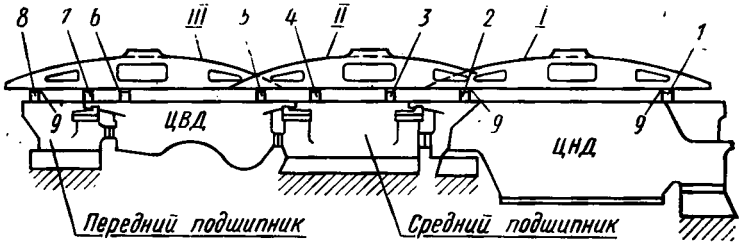


Рис. 222. Схема центровки двухцилиндровой турбины по уровню

Зазор на призмах *3* и *4* на разъеме среднего подшипника допускается 0,1—0,2 мм.

В положении *III* линейка устанавливается на призмы *5* и *6*. В этом положении поднимают или опускают переднюю часть ЦВД относительно задней его части и, таким образом, выставляют весь корпус горизонтально. Корпус переднего подшипника относительно ЦВД контролируют по линейке, поставленной на призмы *6* и *8*. Зазор на призме *7* допускается до 0,2 мм.

При центровке корпусов в горизонтальной плоскости следовало бы доводить показания уровня до нуля. Но роторы турбины имеют прогиб под действием собственного веса и при горизонтальном положении цилиндров и подшипников заняли бы положение, показанное на рис. 223, *а*. Торцы полумуфт роторов оказались бы не параллельными, чего нельзя допускать. Чтобы обеспечить параллельность торцов полумуфт и установить их в положения по рис. 223, *б—г*, необходимо ротор высокого давления наклонить так, чтобы шейка *V* имела одинаковый уклон с шейкой *VI*, т. е. на угол 0,5°. Уклоны задаются в условных градусах по уровню: 1° соответствует уклону 0,1 мм на 1000 мм длины. При этом подъем шейки *II* составит 0,5° + 1,5° + + 0,5° = 2,5°.

Определив, таким образом, уклоны роторов, определяют уклоны корпусов турбин и подшипников. Величина уклона оси корпуса принимается как средняя из уклонов шеек ротора. При

направлении уклонов шеек ротора в одну и ту же сторону уклон корпуса принимают равным полусумме уклонов шеек. При направлении уклонов шеек в разные стороны уклоны корпусов принимают равными полуразности уклонов шеек.

Уклоны корпусов, которые необходимо учитывать при центровке по уровню, задаются в монтажных чертежах турбины

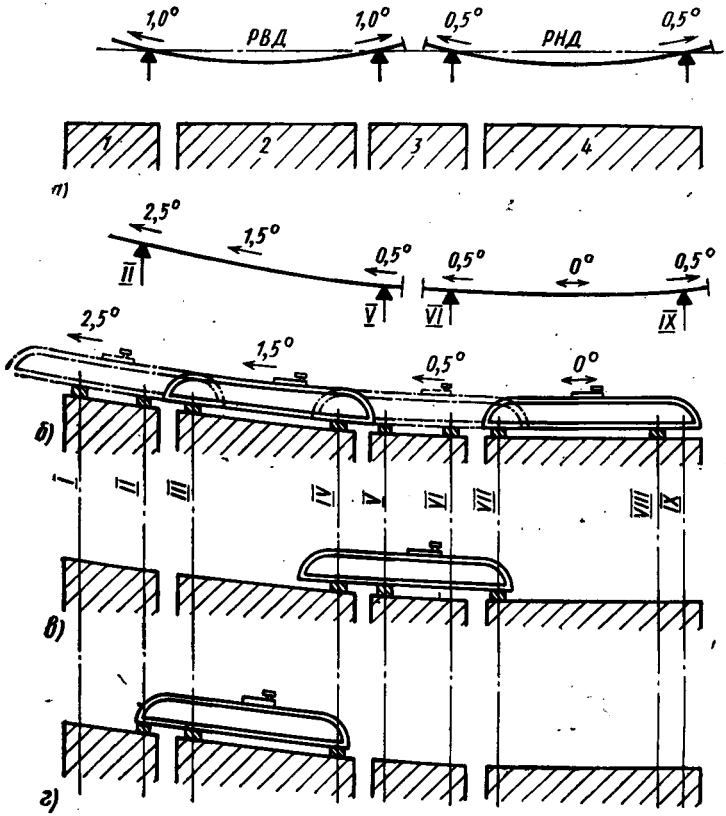


Рис. 223. Схема центровки корпусов турбин и подшипников по уровню:

1 — передний подшипник; *2* — ЦВД; *3* — средний подшипник; *4* — ЦНД: *I* — расточка корпуса переднего подшипника; *II, V, VI, IX* — расточки под вкладыши; *III, IV, VII, VIII* — расточки под уплотнения

Все части корпуса выставляются в соответствии с этими уклонами. В действительности уклоны являются приблизительными и при центровке турбин по муфтам их приходится подправлять в соответствии с фактическими прогибами роторов, которые обычно отличаются от расчетных.

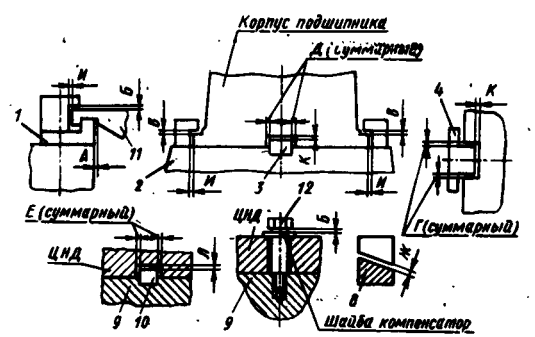
При центровке турбины применяется прецизионный уровень «Геологоразведка». Основная часть уровня — стеклянная трубка (ампула, не полностью заполненная эфиром). Положение

воздушного пузырька измеряется в делениях (условных градусах). Уровень имеет микрометрическую головку с ценой делений 0,02 мм на длину 200 мм или 0,1/1000 мм. Таким образом, одно деление на барабане микрометрической головки соответствует подъему в 0,1 мм на 1 м длины и равно одному делению по ампуле уровня. Обычно пользуются микрометрической головкой; деление на ампуле принимается только для ориентировки.

Точность установки по уровню в продольном направлении допускается до 2°, в поперечном — до 3°. Фиксирование взаимного расположения деталей после центровки по уровню производится при помощи угловых шпонок, на которые опираются цилиндры своими лапами. По размеру *б* (см. рис. 221) шпонки пригоняются заранее, во время подготовки деталей к центровке, и каждая шпонка клеймится номером своего места. По размеру *а* оставляется припуск, который снимается по замерам, сделанным с места. Окончательное крепление шпонок с установкой штифтов производится после центровки по струне или описанным ниже оптическим методом. Зазоры в шпоночных соединениях указаны в табл. 31.

Таблица 31

Зазоры по шпонкам и болтам (рис. 221)



Обозначение зазора	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	И	К	
Допускаемый зазор в мм	0,05—0,08	0,05—0,07	0,04—0,08	0,03—0,10	0,12—0,16	0,04—0,15	0,06—0,08	1,00—1,60	1,75	0,50

Рассмотренный метод центровки по уровню с применением монтажной линейки, являющийся общепринятым для выверки положения корпусов машин при монтаже, давал вполне удовлетворительные результаты и при центровке турбин, пока турбины

строились сравнительно небольшой мощности с корпусами достаточно жесткой конструкции. Однако с увеличением единичной мощности турбин и применением в связи с этим многоопорных корпусов больших габаритов этот метод оказался неудовлетворительным. В течение длительного времени наблюдались случаи неповторяемости заводской сборки турбин при их монтаже у заказчика, несмотря на то, что стендовое положение монтажной линейки воспроизводилось вполне удовлетворительно. Неповторяемость заводской сборки выражалась в нарушении центровки роторов по полумуфтам, по концевым уплотнениям, по диафрагмам в радиальных направлениях и др.

Вследствие этого на монтаже приходилось производить перецентровку турбин, что удлиняло сроки их ввода в эксплуатацию. Кроме того, во время эксплуатации имели место отрывы передних лап цилиндра от переднего подшипника или фундаментных рам от опор, вызывавшие повышенную вибрацию машин.

Для выявления причин этого явления на ЛМЗ были проведены опытные сборки и разборки турбин на стенде с применением тензометрических датчиков, установленных под опоры цилиндров. Сборку и разборку выполняли точно по действовавшей технологии. Измерение нагрузок по опорным точкам производили после каждого этапа работ: установки нижней половины корпуса по уровню; центровки обойм и диафрагм и т. д., вплоть до накрытия цилиндра верхней его частью и обжатия фланца горизонтального разъема.

Измерения показали [8], что в процессе сборки нагрузки по симметричным опорам распределялись не только неравномерно, но при каждой укладке в корпус следующих деталей происходило резкое и неравномерное перераспределение нагрузок. Особенно это было заметно при накрытии цилиндра верхней половиной.

Последующие исследования, проводившиеся путем сборки турбин на заводе и при их монтаже с выравниванием реакций на симметричных опорах и выдерживанием одних и тех же величин реакций как при сборке турбин на заводе, так и на монтаже, показали, что повторяемость заводской сборки на монтаже при этом становится удовлетворительной. Отсюда следует вывод: центровка по уровню в продольном направлении многоопорных нежестких корпусов должна дополняться выравниванием реакций на симметричных опорах. Для наиболее полного использования метода необходима согласованность технологии механической обработки с технологией сборки. Проверка по уровню в поперечном направлении может производиться только как контрольная операция.

Для контроля реакций опор применяют специальные динамометры, устройство которых показано на рис. 224. В основу конструкции динамометра положен принцип определения на-

грузки по величине деформации упорного элемента — в данном случае тарельчатых пружин. Величина деформации пружин под воздействием штока фиксируется индикатором часового типа (ИЧ-5) с ценой деления 0,01 мм. Динамометры предварительно тарируют на лабораторном прессе и снабжают паспортами. Стрелка индикатора показывает нагрузку. Характеристические кривые нагрузок и разгрузок должны совпадать; погрешность измерения при нагрузке и разгрузке не должна превышать 3%. Применяемые динамометры имеют предел измерения 15 т.

Динамометры ввинчивают в лапы цилиндра как, например, указано на рис. 225. Цилиндры турбины при центровке удерживаются на штоках динамометров. Изменение нагрузки регулируют путем завинчивания и отвинчивания динамометров. Места

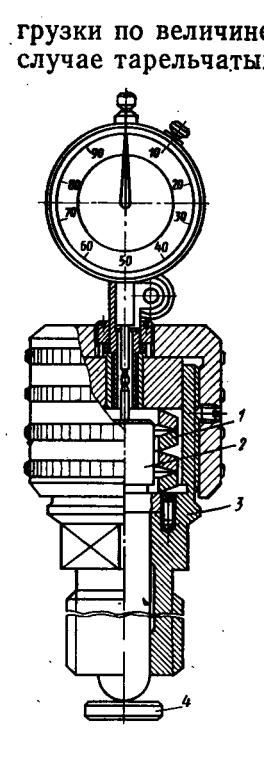


Рис. 224. Динамометр:

1 — тарельчатые пружины; 2 — шток; 3 — корпус; 4 — подкладка каленая на опоре для предохранения ее поверхности от смятия

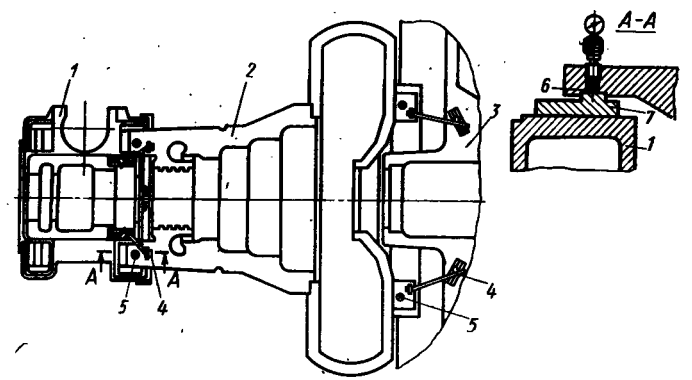


Рис. 225. Схема расположения динамометров и индикаторов на цилиндре:

1 — средний подшипник; 2 и 3 — цилиндры; 4 — индикаторы; 5 — динамометры; 6 — каленая подкладка; 7 — поперечная шпонка

установки динамометров для турбин ЛМЗ показаны на рис. 226.

На ряде заводов применяют метод выверки цилиндров турбин по высотным отметкам опор цилиндров и корпусов подшипников с применением гидростатического уровня, который

позволяет устанавливать корпусы турбин при монтаже по формулярным размерам завода без применения монтажной линейки [12]. Однако этот метод менее надежен, чем предыдущий, особенно в том случае, если определение величин реакций опор при монтаже не производится. Кроме того, отрицательные качества гидростатического уровня накладывают известные ограничения на применение этого метода.

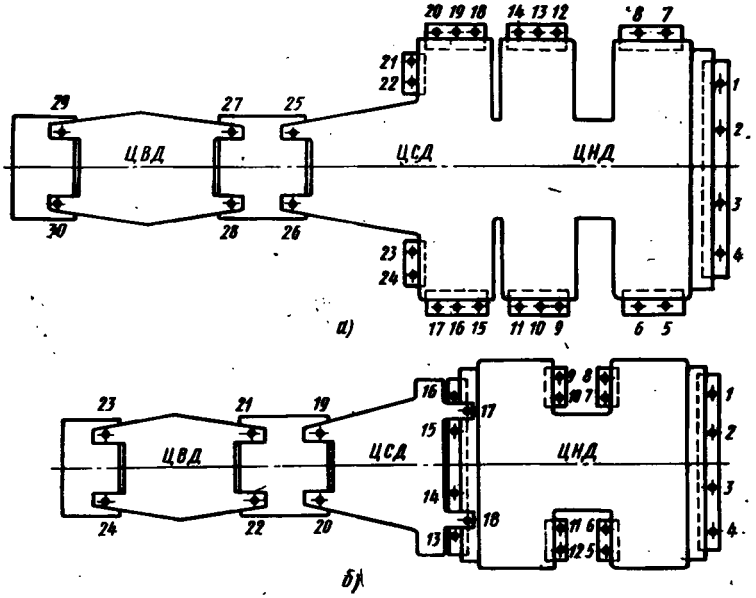
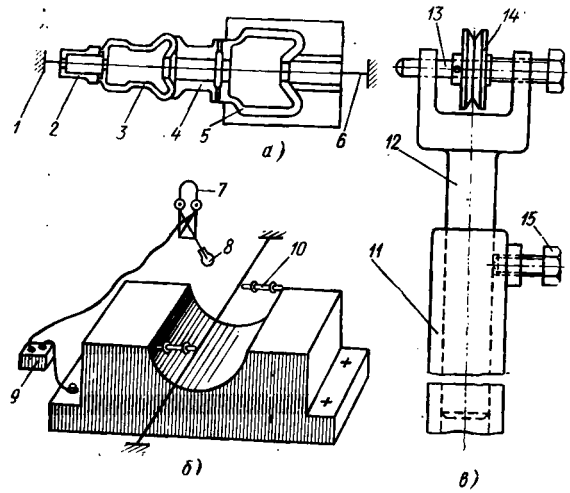


Рис. 226. Схема расположения динамометров в опорах цилиндров и фундаментных рамах турбин ЛМЗ:
а — турбина К-300-240; *б* — турбина К-200-130; *1* — *30* — места установки динамометров

Способ выверки цилиндров турбин по методу «трех точек» [1] может применяться только для одноцилиндровых турбин мощностью до 12 МВт, имеющих относительно жесткие цилиндры небольших габаритов.

Центровка корпусов по струне (рис. 227) имеет целью установить оси расточек цилиндров и подшипников в одной вертикальной плоскости. Стальная проволока (обычно рояльная струна) толщиной от 0,30 до 0,50 мм крепится с одной стороны в конце расточки заднего уплотнения турбины низкого давления и с другой стороны к приспособлению, установленному в передней части фундамента, перед корпусом переднего подшипника. Простейшее приспособление для крепления струны показано на рис. 227, *в*. Натяжение струны производится грузом, по своему весу равным $^2/_3$ разрывающего груза. Струна устанавли-

вается по оси цилиндра низкого давления. Оперируя приспособлением и производя замеры штихмасом от расточек этого цилиндра под уплотнения (рис. 227, *б*), добиваются того, чтобы струна оказалась расположенной точно по центру его передней и задней расточек. Для удобства наблюдения при замерах в проверяемой расточке под струной кладут лампочку и накрывают ее белой бумагой. Затем, замеряя штихмасом расстояния до



— Рис. 227. Схема центровки по струне корпусов турбин и подшипников:

а — схема центровки турбины (вид в плане); *б* — схема замеров расточек штихмасом; *в* — приспособление для крепления струны; *1* — места крепления струны в приспособлениях; *2* — передний подшипник турбины; *3* — корпус высокого давления; *4* — средний подшипник; *5* — корпус низкого давления; *6* — струна; *7* — телефонные трубки; *8* — сигнальная лампа; *9* — источник тока; *10* — штихмас; *11* — трубчатая стойка; *12* — выдвижная вилка для регулировки высоты; *13* — ось-винт для перемещения ролика с подвешенным к струне грузом в поперечном направлении; *14* — ролик; *15* — стопорный винт

струны в местах расточек под вкладыши подшипников и расточек под уплотнения в цилиндре высокого давления путем перемещения их в горизонтальной плоскости, доводят их до правильного положения относительно струны, т. е. добиваются, чтобы струна приходилась ровно в центре расточек. Точность установки задается допустимой разницей замеров с правой и левой сторон струны. Разница замеров допускается для расточек под уплотнения до 0,1 мм, а для расточек под вкладыши — до 0,25 мм.

Перемещение осуществляют с помощью упоров (см. рис. 218, *ж*). Обычно эту работу ведут два человека — один делает замеры и дает сигналы, второй винтами упоров перемещает центри-

руемую деталь. Фиксация взаимного расположения частей корпусов турбины после установки по струне производится с помощью вертикальных шпонок (см. рис. 221 и табл. 31), которые выставляются с требуемыми зазорами и закрепляются болтами или прихватываются электросваркой. После окончательной разделки отверстий под призонные болты, их установки и окончательного крепления вертикальных шпонок производится повторная проверка центровки. Разделку отверстий под призонные болты для стопорения вертикальных шпонок можно производить пневмодрелями или на расточных станках, для чего детали снимаются со стенда.

Центровка турбины по расточкам под уплотнения (по валам) имеет целью достигнуть совпадения осей роторов с осями расточек корпусов и тем самым обеспечить равномерность радиальных зазоров в уплотнениях и других деталях турбины. Необходимость центровки по валам вызывается отклонениями, имевшими место при расточке корпусов и расточке вкладышей, и главным образом наличием масляного зазора между отверстием во вкладыше и шейкой ротора. Ротор, опущенный на вкладыши, ложится ниже на половину величины масляного зазора. При этой центровке правильное положение ротора достигается перемещением вкладышей путем изменения толщины прокладок под опорными подушками вкладышей (см. рис. 169). Ротор поднимают, опускают или перемещают вправо или влево без нарушения предыдущих центровок. Для данной центровки в корпусах подшипников должны быть установлены вкладыши, предварительно пригнанные по баббиту. Центровка может вестись непосредственно по роторам турбины или по специальным калибровым валам. При наличии калибровых валов производство замеров значительно облегчается.

Калибровый вал, или, иначе говоря, фальшвал (рис. 228), изготовляют из толстостенных труб с такой же точностью размеров опорных шеек, как и у рабочего вала турбины. Конусность шеек не должна превышать 0,06 мм на 1 м длины. Биение шеек допускается не более 0,02 мм, а овальность — не более 0,01 мм. В связи с тем, что калибровый вал может прогибаться под действием собственного веса, при его конструировании выбирают такие сечения и вес вала, при которых стрела прогиба была бы равна или очень близка к стреле прогиба ротора турбины. Применение калибрового вала значительно сокращает время сборки.

При центровке калибровый вал укладывается на вкладыши подшипников турбины. Положение его проверяется по расточкам под уплотнения в корпусе турбины. Проверка осуществляется путем замера радиальных расстояний между калибровым валом и расточками. Замеры производятся в трех направлениях: два — в горизонтальной плоскости и один — в вертикальной. Ось калибрового вала будет совпадать с осью расточки,

если все три измерения будут равны. Допускается отклонение не более 0,02 мм. Замеры осуществляются с помощью приспособления, показанного на рис. 229. Поскольку абсолютные величины расстояний от расточек под уплотнения до калибрового вала

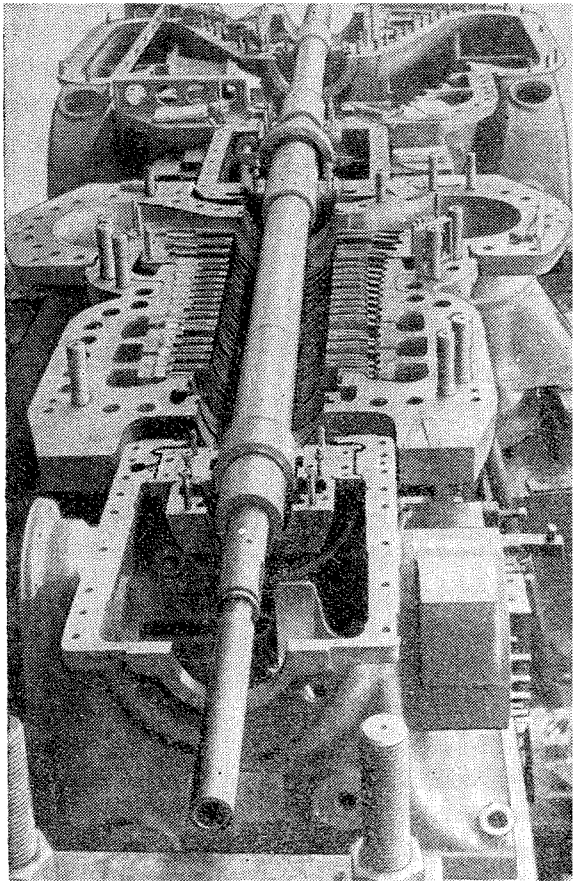


Рис. 228. Схема центровки турбины по расточкам под уплотнения

в данном случае не имеют значения, отклонение от концентричности положения калибрового вала устанавливается по зазору между приспособлением и расточкой. Замер зазора производится щупом.

Оптический метод центровки турбин стал находить применение в СССР начиная с середины шестидесятых годов. Оргэнергострой совместно с ЛМЗ и трестом Мосэнергомонтаж внедрил

этот способ для центровки цилиндров и диафрагм при сборке на заводском стенде и при монтаже турбин большой мощности. Внедряется этот метод и на других турбинных заводах. Ниже дается краткое описание метода.

В основу оптического метода положена не меняющая своего положения оптическая ось зрительной трубы, выверенная по проектной оси турбоустановки и принимаемая за базу отсчета в процессе центровки (рис. 230, *а*). В качестве зрительной трубы применяется микротелескоп ППС-11.

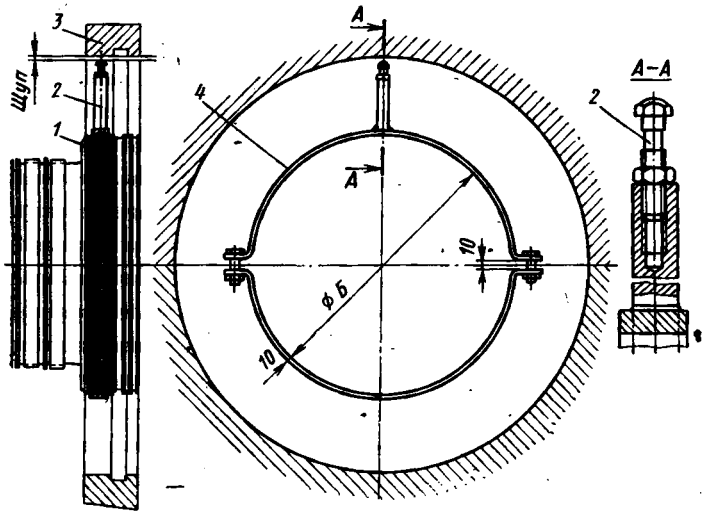


Рис. 229. Схема приспособления для центровки роторов по расточкам под уплотнения:

1 — вал ротора; *2* — надставка; *3* — цилиндр; *4* — хомут (диаметр *Б* соответствует диаметру вала под уплотнения)

Телескоп снабжен измерительной системой, сконструированной на основе закона преломления световых лучей плоскопараллельной пластиной (рис. 230, *д*). Сущность измерений заключается в создании с помощью микрометрического устройства телескопа такого угла φ наклона пластины, при котором луч, проходящий через центр, преломляясь, совмещался бы с оптической осью трубы.

Наклон пластины может осуществляться в двух взаимно перпендикулярных плоскостях микрометрическими винтами, снабженными барабанчиками с микрометрическими шкалами. Определенному углу наклона φ пластины соответствует линейное смещение изображения предмета в миллиметрах, фиксируемое на шкалах барабанчиков. Точность измерения — 0,01 мм.

Процесс центровки турбин осуществляется следующим образом: микротелескоп *1* (рис. 230, *а*) устанавливается на специ-

альном штативе, имеющем передвижную регулируемую площадку, с помощью которой устанавливают точное положение телескопа и совмещение его оптической оси с проектной осью турбины. После совмещения этих осей телескоп закрепляют. Затем в ту расточку корпуса турбины, которую необходимо отцентровать с проектной осью, устанавливают центроискатель

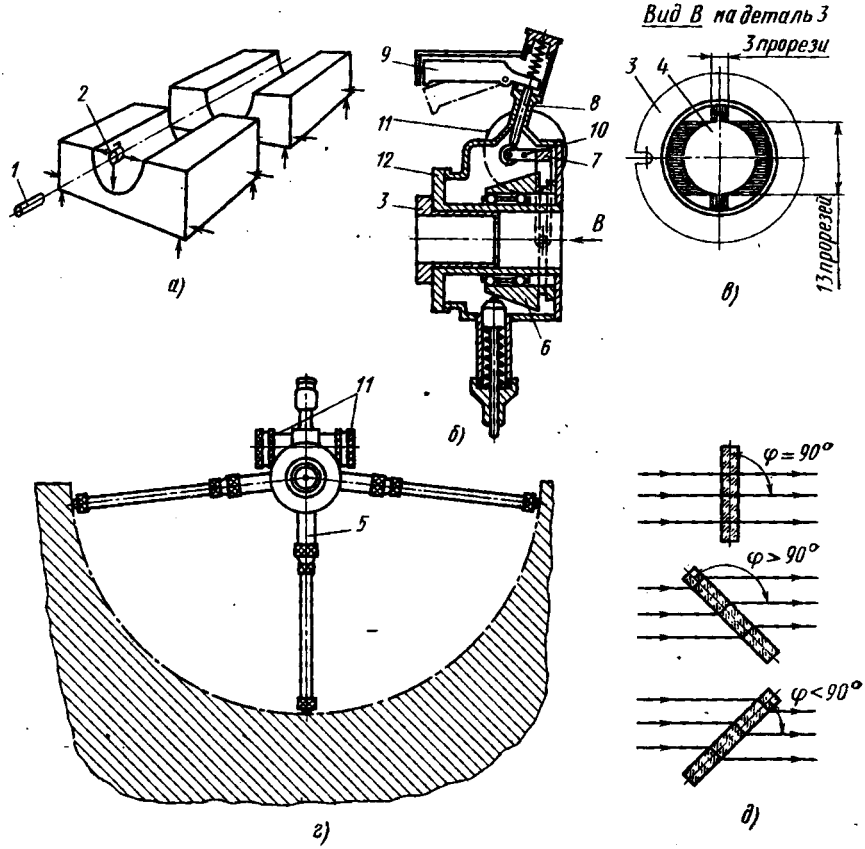


Рис. 230. Схема центровки изделий с помощью оптических приборов

2 с визиром *3* (рис. 230, *б*). Устройство центроискателя схематично показано на рис. 230, *б* и *г*, а его краткое описание приводится ниже.

В качестве визира используется специальная деталь, называемая маркой. Она представляет собой металлический стаканчик *3* (рис. 230, *б* и 230, *в*), в донышке которого имеются вертикальные и горизонтальные прорези с определенным расстоянием между их осями. Совмещенные изображения центра марки *3* и перекрестия телескопа *4* в нулевом положении пока-

заны на рис. 230, *в*. Осуществляется совмещение указанных изображений с помощью микрометрических винтов телескопа, управляющих наклоном прозрачных плоскопараллельных пластин. По показаниям на шкалах микрометрических винтов горизонтального и вертикального перемещений, после достижения нулевого совмещения изображений марки и перекрестия трубы, определяют величины, на которые следует переместить корпус для совмещения центра его расточки с проектной осью турбины.

Устройство центроискателя, названного конусным (рис. 230, *г*) базируется на том принципе, что через три точки можно провести только одну окружность. Поэтому основой конструкции являются три опоры *5*. Последние под влиянием винтовых пружин контактируются с конусом *6*, который через двурогий рычаг *7* и шток *8* связан с рычагом рукоятки *9*. При нажатии на рычаг рукоятки конус *6* перемещается в крайнее правое положение, показанное на эскизе. При этом опоры *5* минимально выступают из корпуса.

При крайнем левом положении конуса выступание опор максимальное. Рычаг рукоятки при этом находится в положении, указанном пунктиром. Перемещение конуса в крайнее левое положение осуществляется под действием двух часовых пружин, соединенных с валиком *10* рычага *7* и помещенных в цилиндрических отсеках *11* корпуса центроискателя.

При установке центроискателя в расточку корпуса турбины оператор нажимает на рычаг рукоятки. Опоры при этом убираются в корпус. После освобождения рычага *9* опоры выступают и прижимаются к расточкам корпуса турбины. Для уменьшения трения конус *6* перемещается по направляющей втулке *12* на шариках, связанных между собой сепаратором.

Перемещение опор под действием конуса равно 12 мм. При большем увеличении радиусов к опорам привинчиваются удлинители, как показано на рис. 230, *г*.

Центровка роторов по муфтам. Завершением всех видов центровок является центровка роторов по муфтам. При помощи центровки роторов по муфтам достигается положение, при котором ось одного ротора становится продолжением оси другого, представляя одну непрерывную плавную упругую линию. Перед центровкой роторов по муфтам корпусы турбин высокого и низкого давления сами должны быть отцентрованы и в них должны быть пригнаны вкладыши и диафрагмы. Для проведения центровки по муфтам роторы опускают в корпусы турбин на опорные подшипники и определяют величину несовпадения осей роторов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Центровка роторов осуществляется при помощи специальных комбинированных скоб, угольников или по полумуфтам.

По своей конструкции скобы позволяют произвести замер аксиальных и радиальных отклонений при помощи винтов *1*, *2*

и 4 (рис. 231). Скобы крепятся к торцам роторов турбины высокого и низкого давления. Обычно комбинированные скобы применяются в тех случаях, когда расстояние между торцовыми плоскостями роторов невелико. Для получения качественных результатов центровки необходимо, чтобы скобы имели жесткую конструкцию, концы винтов должны быть закруглены, что обеспечит точность производимых замеров. Центровка роторов или валов производится на основании замеров радиальных зазоров между винтом 1 и поверхностью скобы 3. Измерение обычно делают в четырех положениях валов: в положении, принятом за нулевое, и затем после поворота обоих валов на 90, 180 и 270°, т. е. в верхнем, нижнем и двух боковых положениях.

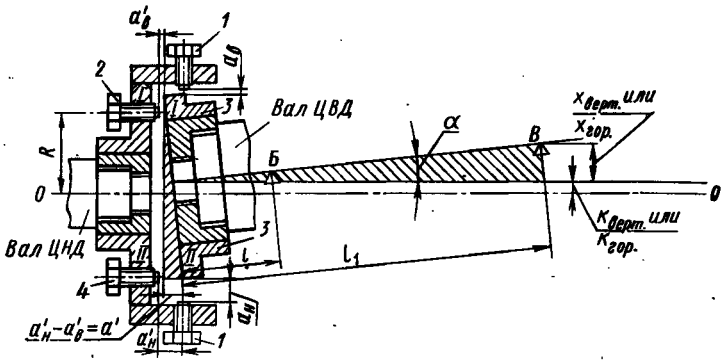


Рис. 231. Определения углового отклонения вала скобой

Замеры выполняются щупом. Проводимые замеры дают возможность определить величину и направление требуемого перемещения прицентровываемого ротора относительно ротора, принятого за базу. Требуемые перемещения осуществляются за счет изменения положения корпусов подшипников и турбины. При повороте валов вокруг оси *О—О* радиальные зазоры будут меняться в четырех положениях вала. Обозначим зазор в верхнем положении через $a_в$, в нижнем положении через $a_н$ и в боковых положениях $a_{б1}$ и $a_{б2}$. Правильность произведенных замеров проверяется путем сложения радиальных зазоров в вертикальной и горизонтальной плоскостях: $a_в + a_н = a_{б1} + a_{б2}$.

Если принять, что оси обоих валов не имеют перекоса и расположены в одной плоскости с расстоянием между осями, равным *K*, то отклонение осей в вертикальной плоскости равно алгебраической полуразности верхнего и нижнего радиальных зазоров: $K_{верт} = \frac{a_в - a_н}{2}$. Также и в горизонтальной плоскости: $K_{гор} = \frac{a_{б1} - a_{б2}}{2}$.

Обычно за базу берут ротор низкого давления. Если величина нижнего зазора больше верхнего, то ротор турбины высокого давления находится выше ротора турбины низкого давления на величину K, или ниже, если верхний зазор больше. Чтобы выдержать соосность, необходимо ротор ВД соответственно опустить или поднять на величину K в плоскости замеров.

Для определения перекоса центрируемых валов производят замеры аксиальных зазоров между винтами приспособления и скобами *3*. Если обозначим верхний зазор через $a'_{в}$, нижний через $a'_{н}$, а боковые $a'_{б1}$, $a'_{б2}$, то тангенс угла перекоса α в вертикальной плоскости будет равен

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{a'_{в} - a'_{н}}{2R}$$

и в горизонтальной

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{a'_{б_2} - a'_{б_1}}{2R},$$

где R — размер от оси вала до контрольной точки замера.

Измерения производят в четырех положениях: в нулевом и после одновременного поворота валов на 90, 180 и 270°. При повороте валов возможен их сдвиг в осевом направлении. Для устранения влияния осевого сдвига при расчете $\operatorname{tg}\alpha$ берут среднеарифметические величины верхних и нижних зазоров, замеренных в исходном положении валов и после их поворота

Если обозначим замер по винту *2* в верхнем положении через $a'_{в_1}$, по винту *4* в нижнем положении через $a'_{н_1}$, а при повороте валов на 180° замер по винту *4* в верхнем положении через $a'_{в_2}$, по винту *2* в нижнем положении через $a'_{н_2}$, то будем иметь в вертикальной плоскости

$$\frac{a'_{н_1} + a'_{н_2}}{2} - \frac{a'_{в_1} + a'_{в_2}}{2} = a'_{верт}.$$

В данном случае на величину $a'_{верт}$ не будет влиять возможное осевое перемещение валов при повороте. Если валы повернуть на 90 и 270°, то замеры по винтам *2* и *4* в горизонтальной плоскости и расчет $a'_{гор}$ надо производить аналогично замерам и расчету в вертикальной плоскости.

Таким образом, величины требуемого перемещения опор *Б* и *В* прицентровываемого вала или ротора в вертикальной плоскости будут равны

$$X_{Б_{верт}} = \frac{a'_{верт} l}{2R} \quad \text{и} \quad X_{В_{верт}} = \frac{a'_{верт} l_1}{2R};$$

в горизонтальной плоскости:

$$X_{Б_{гор}} = \frac{a'_{гор} l}{2R} \quad и \quad X_{В_{гор}} = \frac{a'_{гор} l_1}{2R},$$

где l и l_1 — расстояния от торца муфты до опор $Б$ и $В$ на оси прицентровываемого вала.

Если на величины $X_Б$ и $X_В$ сместить корпусы подшипников, то полностью устраняется имеющийся перекос осей. Аналогично производят замеры и расчет требуемых перемещений и в горизонтальной плоскости.

Практически при центровке валов имеет место радиальное и угловое отклонение осей, т. е. $X + K$. Для расчета величины смещения опор берут их алгебраическую сумму, а после определения замеров имеющиеся отклонения устраняют за одну перестановку корпуса подшипников. Условно принимается перемещение прицентровываемого вала вверх и влево от оси со знаком плюс, а вниз и вправо — со знаком минус.

Обозначим отклонение опоры $Б$ прицентровываемого вала от оси $O—O$ по вертикали через D, по горизонтали — через D_1; во второй опоре $В$ величину отклонения по вертикали — через D_2, а по горизонтали через D_3. Формулы для определения отклонения в радиальном и угловом положениях будут иметь вид

$$D = \pm K_{верт} \pm \frac{a'_{верт} l}{2R};$$

$$D_1 = \pm K_{гор} \pm \frac{a'_{гор} l}{2R};$$

$$D_2 = \pm K_{верт} \pm \frac{a'_{верт} l_1}{2R};$$

$$D_3 = \pm K_{гор} \pm \frac{a'_{гор} l_1}{2R}.$$

Если D и D_1 или D_2 и D_3 получаются положительными, то корпус подшипника необходимо сместить вправо и вниз, а если — отрицательными, то корпус подшипника смещают вверх и влево. Для облегчения и ускорения расчета необходимо заготовить формуляр замеров с эскизами, снабдив его пояснительными схемами и формулами.

Центровку роторов по полумуфтам производят аналогично центровке по скобам, но с некоторыми изменениями по замерам и расчетам. Если полумуфты расположены близко одна от другой, то для центровки достаточно ограничиться одной скобой (рис. 232), закрепив ее на полумуфте РНД, для замеров радиальных размеров a — показателей концентричности, а замеры $б$ производить непосредственно между полумуфтами.

Замеры производят также в четырех положениях роторов (0°, 90°, 180°, 270°); при том поворачивают оба ротора. Замеры зазоров *а* и *б* производят с помощью щупов. При этом в каждом положении роторов снимают по одному замеру *а* (против скобы), т. е. a^0, a^{90}, a^{180}, a^{270}, а по торцам полумуфт по четыре замера *б* в диаметрально противоположных местах местах ($б_1$, $б_2$, $б_3$, $б_4$), где $б_1$ и $б_3$ верхний и нижний размеры, а $б_2$ и $б_4$ — боковые. Это необходимо, как указывалось выше, для того, чтобы в дальнейшем при подсчете исключить осевые смещения роторов при их поворотах.

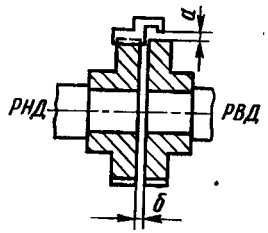


Рис. 232. Схема центровки по полумуфтам

Размеры $б_1$, $б_2$, $б_3$, $б_4$ подсчитывают как средние арифметические в четырех положениях роторов, т. е.

$$б_1 = \frac{б_1^0 + б_1^{90} + б_1^{180} + б_1^{270}}{4}; \qquad б_2 = \frac{б_2^0 + б_2^{90} + б_2^{180} + б_2^{270}}{4} \text{ и т. д.}$$

Если нижний размер $б_3$ замерить не представляется возможным, то можно ограничиться тремя замерами — вверху и по бокам полумуфт ($б_1$, $б_2$, $б_4$). Тогда размер $б_3$ определяют как разность между суммой боковых размеров и верхним, т. е. $б_3 = (б_2 + б_4) - б_1$.

То же самое относится к размерам по окружности, где $a^{180} = (a^{90} + a^{270}) - a^0$.

5. Центровка и пригонка обойм и диафрагм в цилиндрах

В различных конструкциях турбин предусматривается установка диафрагм или непосредственно в цилиндрах, или через обоймы.

В том и другом случае сборка и установка диафрагм должны обеспечить их правильную центровку и фиксацию аксиального и радиального положений в корпусе турбины, концентричность ротора средней окружности паровых каналов диафрагм и их уплотнительных гребней, а также указанные в чертежах величины аксиальных и радиальных зазоров в пазах для их установки, учитывающие тепловое расширение в процессе работы турбины.

Одним из особо важных требований к сборке диафрагм и обойм с корпусом турбины является обеспечение необходимой плотности соединений. Здесь важно обеспечить плотность горизонтальных разъемов и плотность прилегания торцов ободь-

ев диафрагм и обойм к стенкам пазов со стороны паровыхода. Сборка и установка диафрагм и обойм должна начинаться с проверки плотности их прилегания в местах сопряжений.

В цилиндрах турбин невысоких параметров пара [29 кгс/см² (290 Н/см²), 475° С] диафрагмы и обоймы устанавливались на шести радиальных штифтах, выступавших из тела диафрагмы (обоймы) на величину зазора между ней и корпусом. Центровка диафрагмы (обоймы) относительно корпуса достигалась за счет приливания штифтов по высоте. Для возможности теплового расширения между штифтами верхней половины

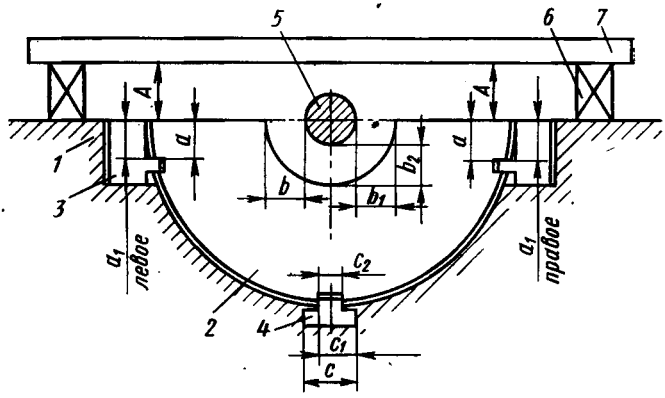


Рис. 233. Схема установки диафрагм на шпонках:
1 — тело цилиндра турбины; 2 — нижняя половина диафрагмы; 3 и 4 — установочные шпонки; 5 — вал-калибр; 6 — призмы; 7 — линейка

диафрагмы (обоймы) и стенками корпуса создавался радиальный зазор, величина которого колебалась в пределах 0,15—0,25 мм, в зависимости от рабочей температуры и размеров детали.

С переходом к более высоким параметрам пара, начиная с 1956 г., с целью обеспечения большей свободы теплового расширения стали применять подвеску диафрагм и обойм на шпонках (лапках). Пример подобной конструкции показан на рис. 233. При такой подвеске вначале производится центровка диафрагмы по высоте за счет пригонки опорной поверхности шпонок и выверки установочных размеров a по замерам от временной шпонки. Проверка по высоте ведется замерами от калиброва вала: размер b_2 должен быть равен $\frac{b+b_1}{2}$. Проверка горизонтальности разъема производится замерами от линейки. Затем диафрагму точно центрируют, добиваясь равенства размеров b и b_1, и замеряют размер c_1 для нижней центрирующей шпонки. Нижняя шпонка по размерам c и c_2 обрабатывается по замерам с места. После пригонки все шпонки

маркируют. Стопорные шайбы верхних половин пригоняют с зазором, обеспечивающим вертикальное перемещение диафрагм до 0,4 мм.

На рис. 234, *а* показано крепление обойм и диафрагм в цилиндре турбины К-200-130. Такое крепление позволяет производить надежную центровку деталей и в то же время допускает свободное тепловое расширение их без нарушения центровки.

В этой конструкции установка деталей по высоте регулируется за счет изменения толщины компенсирующих подкладок.

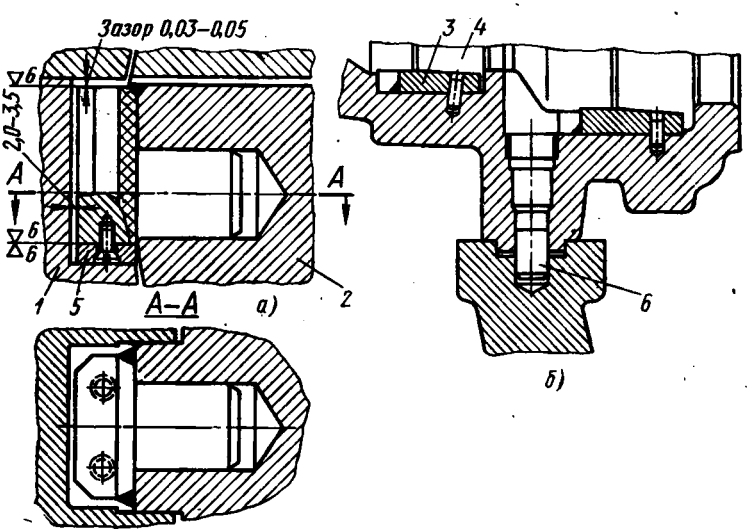


Рис. 234. Схема закрепления обойм и диафрагм в цилиндре турбины К-200-130:

1 — тело цилиндра; *2* — обойма; *3* — шпонка; *4* — диафрагма; *5* — компенсирующая подкладка; *6* — специальный штифт

Для фиксации положения обойм после их центровки (против сдвига их в поперечном направлении) здесь применены специальные радиальные штифты *6* (рис. 234, *б*). Отверстия под штифты рассверливают и развертывают по 2-му классу точности при сборке. Для фиксации диафрагм в поперечном направлении и для центровки обойм применяют обычные призматические шпонки со скошенной верхней плоскостью, что необходимо для удобства заведения шпонки в паз диафрагмы. Шпонку закрепляют штифтами и затем приваривают к корпусу. Некоторые заводы вместо установки штифтов прихватывают шпонки электросваркой, что намного упрощает процесс сборки. После удаления диафрагм шпонки приваривают к корпусу окончательно

6. Центровка опорных подшипников

Опорные подшипники должны обеспечивать совпадение оси ротора турбины с осью корпуса, а также отвод тепла от шеек ротора, образующегося при работе турбины в результате трения и нагрева от близко находящихся горячих частей корпуса.

Методы центровки вкладышей подшипников зависят от их конструкции. В турбиностроении применяются три вида вкладышей: цилиндрические нерегулируемые (жесткие), цилиндрические регулируемые и шаговые самоустанавливающиеся.

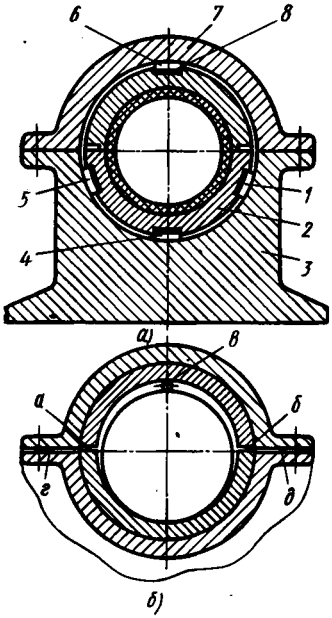


Рис. 235. Регулируемый вкладыш (*а*) и проверка зазоров методом свинцовых отпечатков (*б*)

Жесткие цилиндрические вкладыши (см. рис. 168) по своей конструкции исключают возможность радиального перемещения относительно корпуса подшипника. В случае надобности радиальное перемещение осуществляется перемещением всего корпуса подшипника или сносом оси расточки вкладыша по отношению к наружным посадочным местам. Центровка жестких цилиндрических подшипников состоит из пригонки наружных посадочных мест вкладышей к расточке корпуса турбины, шабровки вкладыша по баббиту и проверки прилегания баббита к шейкам ротора.

Жесткие нерегулируемые вкладыши применяют во вспомогательных механизмах, судовых турбинах и стационарных турбинах малой мощности. В мощных стационарных турбинах применяют регулируемые вкладыши. Схематичное изображение подшипника в сборе с регулируемым вкладышем показано на рис. 235, *а*. Вкладыш 2 устанавливается в корпус *3* подшипника на подушках *1*, *4* и *5*. Таких подушек обычно применяется четыре: три в нижней половине и одна в верхней. Между вкладышем и подушками ставятся тонкие стальные прокладки 8. Радиальное перемещение вкладыша в расточке корпуса подшипника (как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях) достигается подбором толщины прокладок *8* под подушками *1*, *4* и *5*. Изменением толщины прокладки под подушкой *6* можно создавать необходимый натяг от крышки *7*, чтобы во время работы вкладыш был плотно зажат в корпусе подшипника во избежание появления вибрации турбины.

Центровку вкладыша начинают с проверки прилегания опорных подушек *1*, *4* и *5* к расточке корпуса подшипника. Проверка производится по краске. При необходимости пришабривают опорные подушки до полного прилегания. Затем укладывают калибровый вал на нижние половины вкладышей и проверяют положение вала относительно расточек под уплотнения. Одновременно производят проверку прилегания поверхности баббита к шейкам ротора.

При регулировании положения вала за счет изменения толщины прокладок под подущками *1*, *4* и *5* необходимо одновременно проверять и прилегание подушек к расточке корпуса подшипника по краске. Чтобы обеспечить плотное прилегание всех трех подушек нижней половины к расточке корпуса, поступают следующим образом. По краске и щупу проверяют одновременное касание всех трех подушек и толщину прокладок под нижней подушкой уменьшают на 0,05—0,07 мм. Вследствие этого вкладыш будет надежно оперт на две боковые подушки, а нижняя подушка будет прижата к расточке корпуса *3* после нагружения вкладыша весом ротора.

Подушка *6* в верхней крышке корпуса подшипника пригоняется после пригонки подушек *1*, *4* и *5*. Для осуществления пригонки подушки *6* закрывают шейку ротора верхней половиной вкладыша. Подушку *6* устанавливают на место без прокладки *8*; на наружную поверхность подушки укладывают свинцовую проволоку диаметром 5 мм, ставят крышку *7* и закрепляют ее болтами. При затяжке болтов свинцовая проволока сплющивается. Замерив толщину проволоки после снятия крышки *7*, определяют толщину прокладки под подушку *6*, обеспечивающую требуемый натяг. Величина натяга для крупных турбин принимается в пределах 0,12—0,15 мм. Такой натяг обеспечивает надежное закрепление вкладыша крышкой подшипника и вместе с тем не вызывает поломки фланца чугунной крышки при затяжке крепежа.

Контроль масляного зазора производят методом свинцовых отпечатков (оттисков), как схематично показано на рис. 235, *б*. По толщине оттисков после их обжатия определяют фактические величины зазоров и натяга:

$$\Delta_н = \frac{г+д}{2} - \frac{а+б}{2}; \quad \Delta_з = в - \frac{а+б}{2};$$

где $\Delta_н$ — натяг, необходимый для закрепления вкладыша;
$\Delta_з$ — масляный зазор;
а, *б*, *в*, *г*, *д* — толщина свинцовых оттисков, замеренных после обжатия их при затяжке крышки подшипника.

Последней операцией сборки опорных вкладышей является разделка гнезда под стопорную шайбу и пригонка стопорной шайбы (см. рис. 169) для фиксирования вкладыша от прово-

рота и продольного сдвига. Выполняется эта операция в сборе вкладыша с корпусом подшипника после установления требуемого положения ротора в статоре.

7. Сборка статора с ротором и составление паспорта зазоров проточной части турбины

Сборка статора турбины с ротором заключается в соединении их между собой с требуемыми аксиальными и радиальными зазорами. В состав процесса входят первая и вторая примерки ротора, измерения зазоров при каждой примерке и последующие пригоночные работы для устранения обнаруженных отклонений.

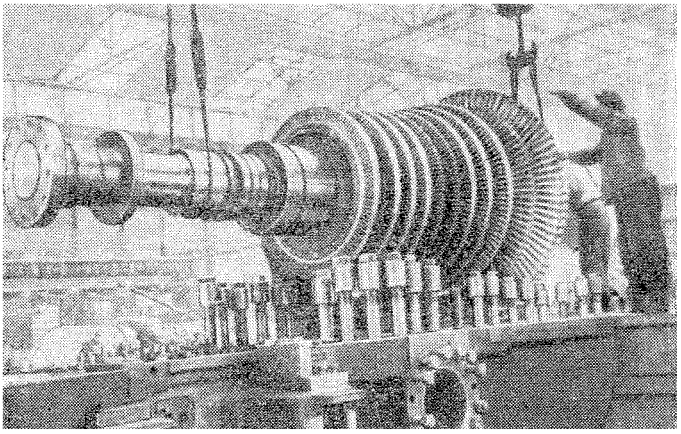
При выполнении сборки требуются специальные подъемно-транспортные приспособления для подъема, проворачивания и перемещения ротора в осевом направлении. Установка ротора в цилиндр показана на рис. 236, *а*; закрытие ЦВД верхней половиной с помощью подъемных приспособлений — на рис. 236, *б*.

При первой примерке ротор устанавливают в статоре так, чтобы между направляющими и рабочими лопатками первой ступени был получен указанный в чертежах турбины зазор. После этого производят измерение фактической величины других зазоров проточной части и составляют паспорт. Затем сравнивают паспортные данные с чертежом. Если какие-то из зазоров по своей величине не соответствуют указанным в чертежах, то стремятся за счет перемещения ротора вдоль цилиндра достигнуть такого положения, при котором количество зазоров, имеющих отклонение от чертежных, стало бы минимальным. Исправление зазоров осуществляют точением плоскостей диафрагм или бандажей на роторе, перемещением диафрагм и другими способами, наиболее подходящими для данного конкретного случая.

После второй примерки ротора производят окончательную доводку зазоров. Положение ротора, при котором замечено лучшее состояние зазоров, отмечают рисками на разъеме цилиндра и на бандаже первой ступени ротора. При этом положении ротора производят окончательное измерение зазоров и составление паспорта.

Пример заполнения паспорта зазоров показан в табл. 32. Бланки паспортов зазоров изготовляются на синьках в виде чертежей с таблицами величин зазоров на отдельные участки проточной части. В таблицах заполнены графы чертежных зазоров и оставлены места для записи фактических зазоров, полученных в результате измерений.

Для измерения аксиальных зазоров пользуются клиновыми щупами (рис. 237). При угле клина 1° расстояние между рисками, соответствующее утолщению клина на 0,02 мм, равно 1,15 мм, что обычно обеспечивает достаточную точность измерений. Пределы измерения щупами — от 1 до 8—10 мм.



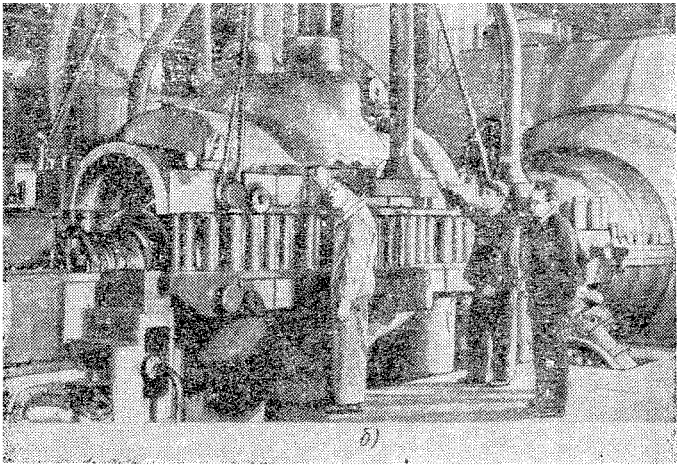


Рис. 236. Установка ротора в цилиндр (*а*) и закрытие цилиндра высокого давления верхней половиной (*б*)

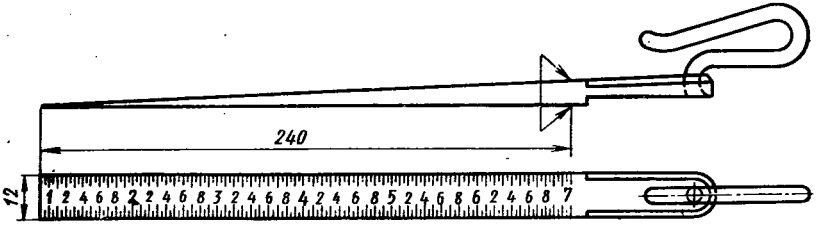
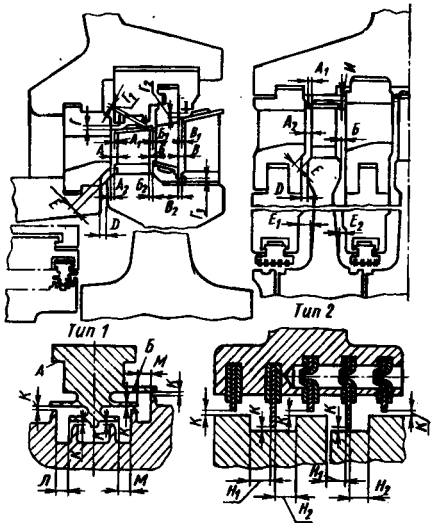


Рис. 237. Клиновой щуп

Таблица 32

Пример составления паспорта зазоров в проточной части турбины



Ступень скорости			Ступень давления			
Зазоры			Зазоры			
обозначение	по чертежу	фактические	обозначение	ступень высокого давления	ступень среднего давления	фактические
A	2,5—4,5	Измеряются в двух положениях ротора: в исходном и после поворота на 90°	A_1	1,5—2,5	2,5—4,0	Измеряются в двух положениях ротора: в исходном и после поворота на 90°
A_1	1,0—2,5		A_2	2,1—3,0	3,0—4,5	
A_2	1,0—2,0		$Б$	Св. 4,5	Св. 5	
$Б$	Св. 3,5		E	Св. 4,0	Св. 4	
$Б_1$	2,5—3,5		E_1	5,6—6,5	7,5—9,0	
$Б_2$	Св. 3,5		E_2	6,5—8,0	6,5—8,0	
B	2,5—3,5		$Д$	2,1—3,0	3,0—4,0	
B_1	1,5—2,0		$И$	4,0—6,0	4,0—6,0	
B_2	1,5—2,0					
$Г—Г_3$	1,5—2,5					
$Д$	Не менее 4					
E	Не менее 3,5					

Елочные уплотнения			Уплотнения диафрагм		
обозначение	переднее	заднее	обозначение	переднее	заднее
K	0,3—0,5	0,3—0,5	K	0,2—0,4	—
$Л$	Св. 1,5	Св. 3	H_1	2,0—5,0	
M	Св. 1,0	Св. 2	H_2	2,0—5,0	

В необходимых случаях применяются щупы с другими углами клина и другими пределами измерений. Для удобства пользования щупом его снабжают движком, аналогичным движку логарифмической линейки, с помощью которого отмечают величину захода щупа в зазор. При отсутствии движка величину захода щупа в зазор определяют по отметке на поверхности щупа, предварительно покрытой тонким слоем лазури.

Правильность замеров контролируют по паровому разбегу ротора. Для этого ротор перемещают до отказа в сторону входа пара и отмечают положение ротора индикатором. Затем перемещают ротор в обратном направлении. Разность показаний индикатора (разбег ротора) должна быть равна сумме наименьших входного и выходного зазоров.

Зазоры в верхней половине цилиндра контролируют только по паровому разбегу ротора при закрытом цилиндре. Отклонение от замеров нижней половины не должно превышать 0,2 мм. Радиальные зазоры проверяют пластинчатыми щупами у разъемов. Результаты замеров также заносят в паспорт. Замеры всех зазоров производят при двух положениях ротора: исходном и после поворота ротора на 90°.

8. Сборка упорного подшипника

Упорный подшипник воспринимает все осевые усилия, действующие на ротор. Его назначение — фиксировать положение ротора относительно статора, достигнутое при доводке зазоров в проточной части. Наряду с этим сборка упорного подшипника должна обеспечить полное прилегание упорных колодок *4* и *5* (рис. 238) к упорному гребню *1* ротора. Это необходимо для равномерного распределения осевых усилий по рабочим поверхностям всех колодок. Несоблюдение данного условия приведет во время работы турбины к перегрузке отдельных колодок, выплавлению баббита и неизбежной аварии.

До начала окончательной сборки упорного подшипника производят подготовительные работы: пригонку упорных колодок *4* и *5* по баббиту и по высоте (допуск на разнотолщинность — 0,02 мм); пригонку шаровых поверхностей обоймы *9* и вкладыша *10* для создания между сферой вкладыша и гнездом обоймы натяга 0,04—0,08 мм. Проверяют прилегание центровочных подушек *8* к расточкам корпуса подшипника. При центровке вкладыша определяют толщину прокладок *7*.

Общая сборка упорного подшипника начинается после установки ротора на вкладыши. Сборку начинают с определения толщины дистанционной прокладки *2* для обеспечения требуемого масляного зазора между упорным гребнем *1* и упорными колодками *4* и *5*. Для этого сдвигают ротор до полного соприкосновения упорного гребня с рабочими упорными колодками *5*. Кольцо *3* с установочными колодками *4* также плотно

прижимают к упорному гребню. Щуп 0,03 мм не должен проходить между поверхностями гребня и колодок. В таком положении производят замер расстояния между торцовой плоскостью корпуса вкладыша и упорными полукольцами *3*.

Необходимую толщину дистанционной прокладки *2* определяют путем вычитания из полученного замера величины чертежного масляного зазора между упорными колодками и гребнем ротора, называемого также масляным разбегом ротора. Нормальный масляный разбег ротора в упорных подшипниках всех

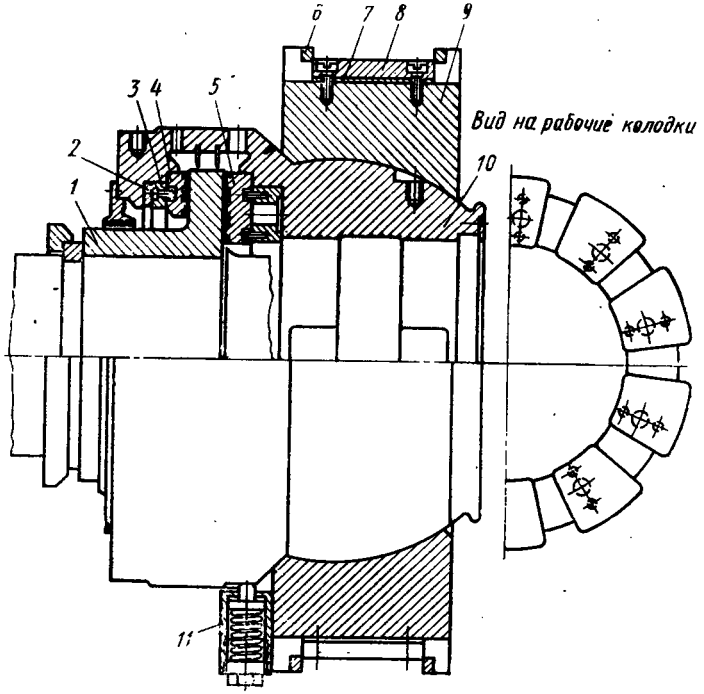


Рис. 238. Опорно-упорный подшипник

типов составляет 0,25—0,50 мм. В турбинах большой мощности величина разбега ротора повышена до 0,40—0,65 мм. В турбине ВК-100-2 он доведен до 0,8 мм в части высокого давления и до 1,0 мм в части низкого давления.

Контроль величины масляного разбега ротора осуществляют аналогично контролю парового разбега ротора. После пригонки подшипника следует хорошо закруглить кромки баббита на колодках, особенно тщательно со стороны входа масла, во избежание срезания слоя масла острой кромкой металла во время работы турбины.

Окончательная проверка прилегания упорных колодок к гребню ротора производится по натиру без краски. Правильно

пригнанные колодки должны прилегать к упорному гребню не менее чем на $^3/_4$ площади поверхности баббита. Если, несмотря на одинаковую толщину колодок, наблюдается различная приработка их, то, прежде чем начинать шабрение колодок, следует проверить правильность установки вкладыша путем подтягивания или ослабления пружины амортизатора *11*. При этом следует убедиться, что шейка вала плотно прилегает к белому металлу по всей длине опорной части.

Фиксирование осевого расположения вкладыша опорно-упорного подшипника соответственно требуемому положению ротора (по зазорам в проточной части) достигается за счет пригонки установочных колец *6*, толщина которых выдерживается по замерам с места.

9. Сборка уплотнений

Наиболее распространенные типы уплотнительных колец были показаны на рис. 193 и 194. Сборка уплотнений заключается в центровке обоймы, сборке обойм с кольцами и обеспечении требуемых радиальных и аксиальных зазоров.

Центровка обойм уплотнений в корпусе турбины производится аналогично центровке обойм диафрагм и самих диафрагм.

Для получения чертежных осевых зазоров *П* и *К* в большинстве случаев бывает необходимо переместить обойму уплотнения вдоль оси турбины. Перемещение осуществляют путем снятия припусков в местах *а* на боковых посадочных поверхностях обойм с выдерживанием размера *А*. Припуск на поверхностях *а* под обработку при сборке оставляют от 2 до 3 мм.

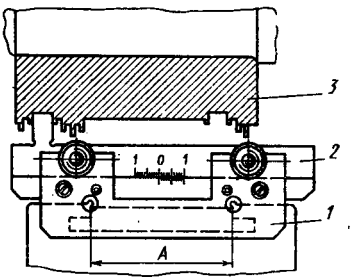


Рис. 239. Специальный шаблон

Для определения величины подрезки припуска пользуются специальным шаблоном (рис. 239). Шаблон состоит из неподвижной части *2*, которая устанавливается на разъем корпуса турбины и фиксируется по расточке под обойму в корпусе турбины. Подвижная часть шаблона *1* центрируется по гребням уплотнительной втулки *3* на валу ротора. При этом на шкале шаблона отмечается действительное положение гребней уплотнительной втулки на роторе относительно выточки под обойму по посадочному размеру *А* в корпусе турбины. По показаниям шаблона определяют величины подрезки припусков.

Проверка концентричности расточки обоймы относительно оси турбины осуществляется при помощи калибрового вала, мостика и штихмаса (см. рис. 229). Радиальные зазоры *П*

(см. рис. 194) проверяют стальной калиброванной лентой или по свинцовым оттискам. В последнем случае кольца, опирающиеся на пружинки, подклинивают.

Одной из последних операций сборки является подгонка контрольных скоб, аналогичных показанной на рис. 204.

10. Подготовка к закрытию и закрытие турбины под испытание

Подготовка к закрытию является одной из наиболее ответственных работ по сборке турбины. Качественное выполнение данной работы зависит во многом от тщательного соблюдения целого ряда технических требований. В корпусах очищают все карманы, углы и другие малодоступные места от возможных остатков стружки и других посторонних предметов. Особо тщательно очищают паровое пространство — сопловые и направляющие аппараты, диафрагмы, уплотнительные кольца, лопаточный аппарат ротора, а также участки масляного тракта — внутренние поверхности корпусов подшипников, опорных и опорно-упорных вкладышей, упорные колодки и др. Перед установкой на место все детали обдувают сжатым воздухом, рабочие поверхности вкладышей смазывают маслом.

После установки ротора проверяют паровой разбег ротора для нижней половины цилиндра. Разбег проверяется дважды: в исходном положении и после поворота ротора на 180°. Перед установкой на место верхней половины цилиндра ее приподнимают специальным подъемным приспособлением и выверяют в горизонтальном положении по уровню, предварительно продув сжатым воздухом. После установки проверяют паровой разбег ротора для верхней половины. Величина разбега не должна отличаться от полученной при проверке нижней половины более чем на 0,2 мм.

Уплотнение горизонтального разъема цилиндра осуществляется мастикой, которая перед закрытием цилиндра наносится на плоскость разъема нижней половины слоем толщиной 0,2—0,5 мм.

Для приготовления мастики применяют льняное масло, из которого путем проварки удаляют влагу и белковые вещества. После этого в масло добавляют графит в пропорции 1 : 1. Применяют и другие составы, например такой: масло 50%; графит 20%; белила 10%; сурик свинцовый 20%. Первый состав является наиболее употребительным.

Чтобы избежать перетяжки и деформирования деталей, затяжку крепежа в групповом болтовом соединении следует производить в определенном порядке (рис. 240) и постепенно, т. е. в два-три приема. Сначала, например, соблюдая указанный на рисунке типовой порядок, следует затянуть гайки весьма слабо, примерно на одну треть полной затяжки, затем на две трети и,

наконец, на полную затяжку. При сборке цилиндров турбин высокого давления и наличии шпилек разных диаметров первоначально производят затяжку крупных, а затем мелких шпилек.

Затяжку гаек производят горячим способом, который выполняют в следующей последовательности. Первоначально, в хо-

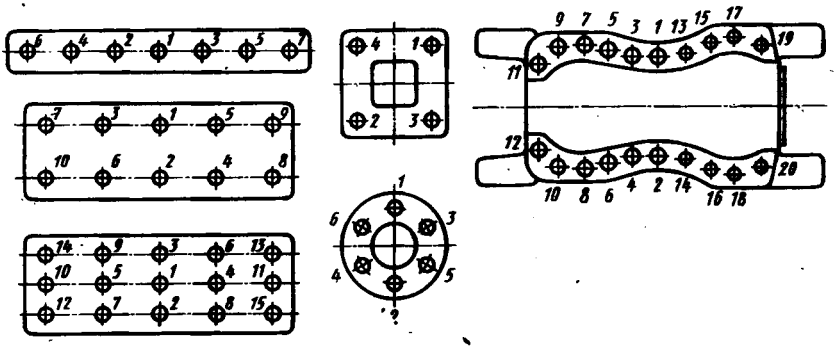


Рис. 240. Типовой порядок затяжки гаек в групповых болтовых соединениях (цифры показывают последовательность затяжки)

лодном состоянии, все гайки навинчивают до отказа с одинаковым усилием вручную накидным ключом с определенной длиной рычага. При этом выбираются все зазоры и выдавливается излишняя мастика. После выполнения холодной затяжки фиксируют положение гайки контрольными рисками — вертикальной, нанесенной на наружной цилиндрической поверхности колпачковой гайки, и ее продолжением на поверхности фланца (рис. 241). Затем отмечают от вертикальной риски по окружности гайки (в направлении против завинчивания) дугу K и наносят на поверхности гайки вторую отметку (вертикальную черту). Величину дуги K определяют расчетом [7]. Дальнейшая затяжка гаек производится до второй отметки уже после нагрева шпилек специальными электро- или газовыми нагревателями [7, 14]. После остывания гайка плотно садится на резьбу болта или шпильки, обеспечивая высокую надежность крепления.

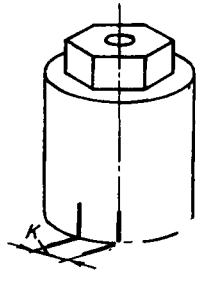


Рис. 241. Разметка положения гайки для горячей затяжки

После закрытия турбины все оставшиеся свободными отверстия заглушают и пломбируют. Этим заканчивают закрытие турбины и составляют акт ее готовности к испытанию. Акт подписывают руководители сборки и представители бюро технического контроля. В акте должно быть особо оговорено, что при закрытии корпусов турбины и подшипников был произведен тщательный осмотр их внутренних полостей, чтобы полностью

исключить наличие в них каких-бы то ни было посторонних предметов.

Особенности сборки современных крупных паровых турбин определяются прежде всего значительным возрастанием их габаритов и веса, а также появлением, в связи с этим, многоопорных корпусов и длинных многоопорных валов, соединяемых жесткими муфтами. Все это требует особой тщательности выполнения операций сборки и выверки положения корпусов и валов. Так, например, из опыта монтажа первых крупных турбин была выявлена необходимость проведения центровки корпусов с применением динамометров. Повышение точности спаривания валов при жестких муфтах должно обеспечить равномерную нагрузку на подшипники и их нормальную работу. Полное освоение центровки турбин с помощью оптического метода и его совершенствование должно еще более повысить качество сборки и монтажа турбин.

Газовые турбины с точки зрения выполнения основных операций общей сборки (центровки роторов и корпусов) имеют, в принципе, одинаковое устройство с паровыми турбинами. Поэтому для центровки и сборки газовых турбин в основном используют описанные выше методы центровки и сборки паровых турбин. Некоторые особенности сборки газовых турбин вытекают из особенностей конструкции отдельных их элементов, наличия при их эксплуатации высоких температурных градиентов в отдельных частях турбины. Это требуется учитывать, например, при облопачивании, допуская наличие холодных зазоров, которые автоматически выбираются при достижении рабочей температуры. Имеются различия в методах облопачивания, вызванные применением охлаждаемых лопаток, и некоторые другие особенности.

Поскольку газотурбинные двигатели являются новым и быстро развивающимся видом двигателей, они быстро будут совершенствоваться. Вместе с этим будет непрерывно совершенствоваться и технология их производства и сборки.

11. Испытание турбины на заводском стенде

Последний этап сборочных работ тесно увязан со стендовыми испытаниями.

На заводе много внимания уделяется точности обработки всех деталей и сборочных единиц турбины. Однако трудно без проверки при вращении на рабочем числе оборотов определить, как будет работать данная турбина в эксплуатации. Объясняется это сложностью размерных цепей турбины, наличием упругих и термических деформаций и другими особенностями производства такой исключительно сложной машины, которой является современная мощная турбина.

Собранная турбина суммирует в себе все отдельные погрешности деталей. При испытании выясняется и устраняется ряд дефектов в сопряженных соединениях. Результаты испытаний и наладки турбин во многом зависят от качества сборочных работ. Стендовые испытания имеют весьма важное значение и от их полноты в значительной степени зависит качество выпускаемых заводом турбин. Стендовые испытания являются важным моментом в технологии турбиностроения. Они помогают заблаговременно устранить дефекты и сокращают период монтажа и наладки турбины на электростанции.

Общая сборка турбины является одновременно и сборкой ее для стендовых испытаний. Узлы турбины доставляются на участок стенда в собранном виде. Площадь стенда и является местом сборки турбин. Вспомогательное оборудование стенда, состоящее из конденсаторов, эжекторов, маслоохладителей, циркуляционных и конденсатных насосов, паропроводов и других устройств, располагается рядом со сборочным цехом. Все эти вспомогательные устройства являются постоянным оборудованием стенда. Турбины проходят испытания без своих вспомогательных агрегатов, которые при испытании заменяются аналогичным оборудованием стенда.

Цель стендовых испытаний — проверить правильность сборки и качество работы турбины. Следует, однако, подчеркнуть, что в процессе стендовых испытаний качество турбины может быть определено в основном лишь с точки зрения ее чисто механических свойств. При этом испытании выявляются неточности сборки, ненормальности износа трущихся частей, возможное задевание деталей, находящихся друг от друга на расстоянии минимальных зазоров, и недостаточность регулирования в заданных пределах.

При проведении стендовых испытаний проверяют правильность установленных зазоров по концевым и диафрагменным уплотнениям, зазоров в проточной части турбины, работу уплотнений, качество и пригонку вкладышей, действие органов регулирования и главного масляного насоса, работу червячной пары, соединительных муфт и регулятора безопасности.

Стендовые испытания лишь в редких случаях могут быть произведены при условиях, вполне соответствующих нормальной работе турбины в эксплуатации, так как нецелесообразно приспосабливать котельную установку турбинного завода к полным номинальным параметрам пара вновь изготовленной на заводе для поставки заказчику турбины. Кроме того, для мощных паровых турбин создать полную нагрузку при испытании их на заводе практически невозможно. Это потребовало бы установки дорогих тормозных устройств и котлов большой производительности для получения перегретого пара, нормальных или высоких параметров и мощного конденсационного и охлаждающего устройства для циркуляционной воды. На стенде невоз-

можно проверить турбину на режимах работы с отбором пара и сбросами нагрузки. Поэтому на испытательном стенде работа главных турбин проверяется только на холостом ходу, однако при нормальной для данной турбины частоте вращения. Начальные параметры пара для испытания на заводе снижаются. Это означает, что пар, поступающий в турбину на стенде, имеет рабочие параметры ниже номинальных параметров пара турбины.

Перед испытанием турбины на стенде производят самостоятельные испытания и настройку отдельных узлов, как, например, скоростного регулятора и регулятора безопасности, что дает возможность сократить срок испытания всей турбины. При проведении испытаний на заводе ведется журнал, в который записываются результаты испытаний, указываются полученные характеристики работы турбины.

Вся работа по приемке испытаний ведется отделом технического контроля завода. Вполне достаточно, чтобы длительность испытания составляла около 4 *ч* с момента развития турбиной нормального числа оборотов, так как за этот промежуток времени может быть достаточно полно определен характер работы турбины.

После испытания турбины следует разобрать ее основные трущиеся части: подшипники, элементы регулирования, червячную пару, зубчатые колеса главного масляного насоса. Необходимо также тщательно осмотреть и установить качество пригонки и приработки отдельных частей. В случае выявления существенных недостатков в отдельных деталях при первом испытании стендовые испытания следует повторить. После остановки турбины ее корпус вскрывают лишь после того, как детали достаточно охладятся, так как холодный воздух, неравномерно охлаждая нагретые части, может вызвать их коробление.

После тщательной ревизии и устранения обнаруженных дефектов все детали красятся и консервируются для предохранения их от коррозии во время транспортировки и хранения их на месте монтажа. Упаковка производится в соответствии с упаковочными чертежами.

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

МОНТАЖ ТУРБИН

Глава XXV. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОНТАЖА ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Под монтажом турбин понимается сборка их на фундаменте на месте их постоянной работы совместно с генератором (на ГРЭС, ТЭЦ), наладка и сдача в эксплуатацию.

Монтажу турбин посвящено много трудов, среди которых следует особо отметить работу [1]. В ней подробно рассмотрены организация и проведение монтажа паровых турбин, турбогенераторов и их вспомогательного оборудования, а также пуск турбоустановки и ее монтажная наладка.

Вопросам увязки всех этапов создания действующей энергетической установки, а именно: конструирования, технологии заводского изготовления и сборки, транспортирования и, наконец, монтажа турбин посвящен труд [12]. В нем на основе результатов, полученных аналитическим и экспериментальным путем, даются практические рекомендации по учету требований повышения эффективности монтажа турбин на предшествующих этапах подготовки турбинного оборудования к монтажу и по внедрению современной прогрессивной технологии монтажа.

В настоящей книге по возможности наиболее кратко излагаются лишь самые основные вопросы и освещаются главные этапы монтажа турбин в объеме, предусмотренном программой курса производства турбин, чтобы дать учащемуся достаточное представление о монтаже паровых и газовых турбин у потребителей. Для более глубокого изучения технологии монтажа турбин рекомендуется указанная выше литература.

В прошлом, когда изготовлялись турбины лишь небольшой мощности и сравнительно небольших габаритов, заводская сборка являлась заключительным этапом всего производственного процесса их изготовления, а монтаж — первым этапом ввода турбины в эксплуатацию.

В послевоенный период при изготовлении паровых и газовых турбин большой единичной мощности и очень больших габаритов многие узлы уже не могут быть полностью закончены на заводе (например, конденсаторы, из-за невозможности их транспортировки в готовом виде), поэтому некоторые работы по изго-

товлению турбин выполняются уже на монтажных площадках в местах эксплуатации турбин.

Стендовые испытания турбин на заводе являются необходимым этапом производственного процесса, позволяющим выявить многие дефекты турбин и устранить их на заводе. Но когда часть работ по изготовлению и сборке отдельных частей турбины выполняется впервые на монтажной площадке, заводские испытания не исключают появления при пуско-наладочных работах ряда серьезных недостатков заводской сборки турбины и даже ее конструкции.

Монтаж современных турбоагрегатов большой единичной мощности представляет собой ответственную работу, при выполнении которой приходится решать много сложных технических и организационных задач. Успешное проведение монтажа зависит от строгого соблюдения технологии, высокой квалификации персонала, правильной организации работ и слаженной работы всех организаций, участвующих в монтаже турбоагрегата.

Графики работ. Особое значение при монтаже турбин на электростанции имеют общие графики монтажных работ, так как последовательность и сроки окончания монтажа турбины, генератора, вспомогательного оборудования и трубопроводов установки должны находиться в единой технологической связи с монтажом оборудования всей электростанции.

Основными организациями, участвующими в монтаже турбины, являются монтажная организация, строительная организация, завод-поставщик турбины, наладочная организация и организация-заказчик.

В разрабатываемых графиках указываются исполнители мероприятий и сроки их выполнения. Рекомендуется составление следующих графиков: общий календарный график работ; график подготовительных хозяйственных работ; график подготовительных работ по монтажу; бригадные графики работ; график пусковых и наладочных работ.

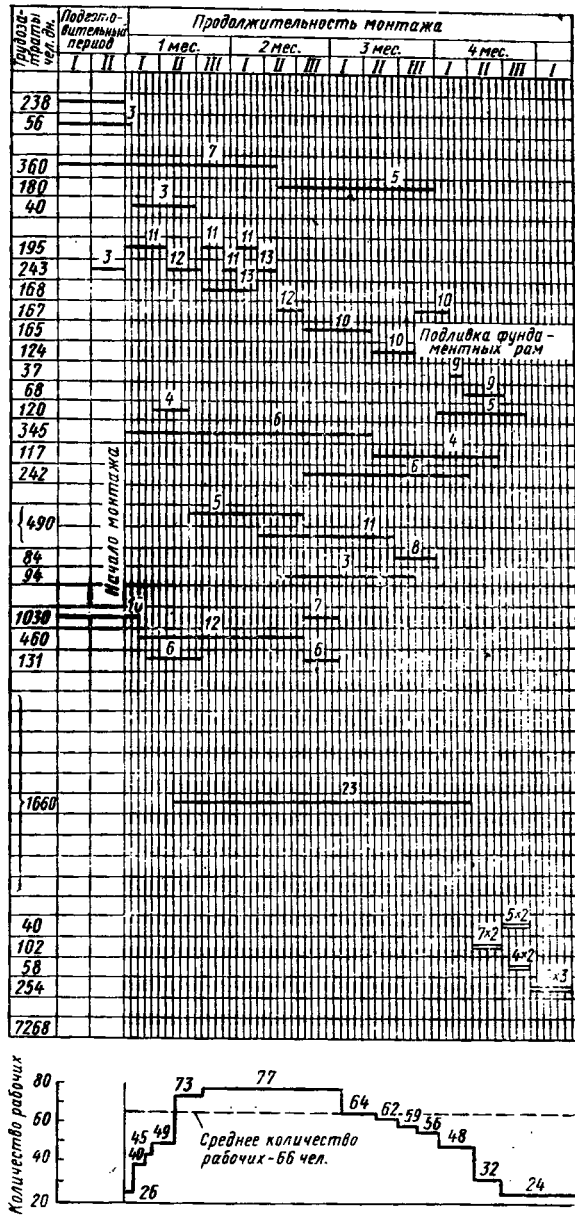
Продолжительность монтажных работ и сроки окончания их принимаются в соответствии с народнохозяйственным планом ввода агрегатов в эксплуатацию и директивными нормами продолжительности монтажа агрегатов. Нормы трудоемкости монтажа паротурбоустановок, например, составляют, примерно, в человеко-днях: для турбины 300 МВт — 18 000; для турбины 200 МВт — 13 000; для турбины 100 МВт — 7500; для конденсационных турбин 50 МВт — 5000 и для теплофикационных турбин той же мощности — 6500; для турбин 25 МВт — 2700—4400.

Организация работ. Монтажные работы по машинному залу производятся турбинным цехом монтажного участка. Перечень основных этапов монтажа и их трудоемкость приведены в табл. 33. В цехе обычно создаются следующие комплексные бригады: первая — по монтажу турбины и генератора; вторая — по монтажу трубопроводов; третья — по монтажу маслопроводов

Таблица 33

Примерный график монтажа турбины К-200-130

Наименование работ		Трудоемкость, чел.-дн.
1 Подготовка фундамента к монтажу	1	
установка закладных плит		238
полная подготовка		56
2 Подготовка оборудования турбины к монтажу:	2	
фундаментных рам и корпусов		360
органов регулирования и парораспределения		180
органов масляной системы		40
3 Монтаж оборудования турбины:	3	
фундаментных рам и корпусов		195
постоянных подкладок		243
роторов (центровка)		168
конденсаторов (подсоединение)		167
диафрагм и зазоров в проточной части		165
закрытие турбины		124
роторов турбины и генератора (соединение)		37
подшипников и валоповорота		68
парораспределения и регулирования	4	120
масляной системы		345
обшивка лестниц и измерительных приборов		117
перепускных труб и ресивера	5	242
4 Монтаж турбогенератора:		
статора и ротора (подготовка)		490
генератора	6	84
возбудителя		94
трубопроводов		1030
5 Монтаж вспомогательных устройств:		460
конденсатора		131
подогревателей, эжекторов, охладителей		
насосов		1660
6 Монтаж трубопроводов:		
свежего пара		
промежуточного перегрева		
отборов пара на ПВД и ПНД	7	
слива конденсата из ПВД и ПНД		40
основного конденсата		102
уплотнений отсосов		58
дренажей		254
питательной воды	8	7268
отсоса воздуха		
обратных клапанов отбора		
отводов конденсата		
7 Пусковые работы:		
подготовка масляной системы		
продувка паропроводов		
подготовка конденсационной системы		
пуск турбины и наладка		
8 Всего		



и четвертая — по монтажу вспомогательного оборудования. Эти бригады являются основными производственными единицами при монтаже турбин. Обычно в состав бригад входят по 10—15 слесарей от 2-го до 6-го разрядов.

График построен из расчета работы в одну смену. Для ускорения монтажных работ целесообразна организация двухсменной работы. В ряде случаев, при необходимости особого форсирования работ, организуется третья смена, которая, обычно, подготовляет фронт работ для двух первых.

Непосредственными руководителями бригад являются бригадиры, которые назначаются из числа наиболее квалифицированных рабочих 5—6-го разрядов, обладающих хорошими организаторскими способностями. Бригадир должен уметь хорошо читать чертежи и монтажные схемы, знать технологию производства монтажных работ, правила строповки и кантовки крупных деталей оборудования и, особенно, правила охраны труда и техники безопасности.

В целях закрепления отдельных узлов монтируемого оборудования за определенными группами рабочих, повышения ответственности за качество работ и лучшей загрузки рабочих, бригады обычно разделяются на звенья.

Права и обязанности шеф-персонала заводов. Монтаж турбин генераторов и питательных насосов производится с участием представителей (шеф-инженеров) заводов — изготовителей оборудования. Шеф-инженер осуществляет техническое руководство монтажом, пуском, наладкой и сдачей в эксплуатацию всего оборудования турбины.

Шеф-персонал уполномочен разрешать все технические вопросы, связанные с монтажом, комплектностью и качеством поставляемого оборудования и вводом его в эксплуатацию. Монтажная организация должна согласовать с шеф-персоналом заводов график производства работ по турбоагрегату, после чего он становится обязательным для выполнения обеими сторонами. Техническое руководство монтажными работами шеф-персонал заводов выполняет через инженерно-технический персонал монтажной организации с полной ответственностью за свои указания и предложенные методы ведения работ.

Ответственные монтажные операции, такие, как выверка фундаментных рам турбины; установка цилиндров, подшипников и роторов; центрирование узлов турбины; проверка зазоров проточной части, зазоров в уплотнениях и подшипниках; присоединение конденсатора к турбине; закрытие цилиндров, подшипников и клапанов; установка статора генератора; установка ротора генератора в статор и его центрирование; сборка генератора; соединение муфт турбоагрегата; ревизия питательных насосов и пусковые операции, должны производиться при непосредственном техническом руководстве и контроле со стороны шеф-персонала заводов-изготовителей турбин.

Шеф-персонал должен придерживаться организации и технологии выполнения монтажных работ, предусмотренных в проекте производства работ и технологических картах. Исполнительная техническая документация по монтажу турбины, генератора и питательных насосов (акты, формуляры) составляется монтажной организацией совместно с шеф-персоналом заводов и персоналом технического надзора заказчика.

Общие правила выполнения монтажных работ. Монтажные и сборочные работы по турбине, генератору и питательным насосам должны проводиться в строгом соответствии с монтажными инструкциями, выпущенными заводами-изготовителями, а также технологическими картами на монтаж данного оборудования. Все технически обоснованные отступления могут допускаться только при условии согласования их с заводами — изготовителями оборудования и руководством монтажной организации.

Перечень узлов смонтированного оборудования, подлежащих приемке-сдаче с оформлением надлежащей документации, приведен в табл. 34.

Слаженность работы различных организаций является обязательным условием успешного ведения монтажа турбины. Монтажные работы по турбоагрегату выполняются многими организациями: подливку фундаментных рам, опор металлоконструкций и трубопроводов выполняют строители; тепловую изоляцию — теплоизолировщики; монтаж электротехнического оборудования — электрики и т. д.

Работы всех организаций должны быть согласованы между собой и выполняться по единому графику, что должно способствовать повышению качества и сокращению сроков монтажа.

Все выявленные в процессе ревизии качества монтажных работ дефекты должны быть устранены. Факты наличия дефектов должны подтверждаться и активироваться актами, оформляемыми в установленном порядке.

Отчетная техническая документация должна заполняться аккуратно и своевременно. В состав отчетной документации входят: журнал монтажных работ; акты; монтажные формуляры. В журнал записывают: основные этапы работ с указанием времени их начала и окончания; выявленные дефекты и меры, принятые для их устранения; результаты проверок выполнения правил техники безопасности; указания руководителя монтажного участка и представителя заказчика, а также перечень мер по их выполнению.

По окончании работ журнал сдается в производственно-технический отдел монтажного участка. К началу монтажа турбины должны быть закончены следующие строительные работы: а) строительство машинного зала с отоплением (температура на отметке «0» должна быть не ниже +5° С); б) сооружение фундаментов под турбоагрегат и вспомогательное оборудование; в) сооружение лестниц и площадок для обслуживания турбоагрегата

Таблица 34

Перечень узлов смонтированного оборудования машинного зала, подлежащих приемке-сдаче

Наименование узлов	Форма документации	Организации, подписывающие данную форму				
		Монтажная	Строительная	Завод-поставщик	Наладочная	Заказчик
I. Подготовка к монтажу						
Приемка оборудования в монтаж	Акт	+				+
Дефекты оборудования, выявленные в процессе ревизии, монтажа и испытаний	»	+		+		+
Приемка фундамента турбогенератора	Формуляр, акт	+	+			+
Приемка фундамента насосов	То же	+	+			+
II. Монтаж						
1. Турбина						
Гидравлическое испытание собранного конденсатора	Акт	+		+		+
Испытание корпусов подшипников наливом керосина	»	+		+		+
Дата начала монтажа турбины (установки фундаментных рам)	Запись в монтажном журнале	+	+			
Данные по установке цилиндров центрированию роторов, зазорам и другие данные по монтажу турбины	Формуляры	+		+		+
Закрытие цилиндров турбины	Акт	+		+		+
Очистка бака и труб масляной системы	»	+		+		+
Гидравлические испытания узлов масляной системы	»	+		+		+
2. Генератор						
Испытание на плотность корпуса статора, ротора, коллекторов и каналов водяного охлаждения обмотки	»	+		+		+
Гидравлическое испытание газоохладителей (воздухоохладителей)	»	+		+		+
Гидравлическое испытание вспомогательного оборудования системы водяного охлаждения обмоток генератора	»	+		+		+
Осмотр статора и ротора перед установкой ротора в статор	»	+		+		+
Данные по установке, центрированию ротора и зазорам генератора, основного и резервных возбудителей	Формуляры	+		+		+
в) Трубопроводы и теплообменники						
Гидравлическое испытание паропроводов отбора	Акт	+		+		+

Наименование узлов	Форма документации	Организации, подписывающие данную форму				
		Монтажная	Строительная	Завод-поставщик	Наладочная	Заказчик
Испытание плотности вакуумной системы турбины наливом воды	Акт	+		+		+
Гидравлические испытания теплообменников системы регенерации, включая ПВД	»	+		+		+
Проверка чистоты перепускных труб турбины	»	+		+		+
Гидравлическое испытание перепускных труб турбины	»	+		+		+
Данные по зазорам и центрированию с электродвигателями насосов турбоустановки	Формуляры	+		+		+
Готовность узлов турбогенератора для нанесения тепловой изоляции	Запись в монтажный журнал	+		+		
3. Насосы машинного зала						
Данные по установке, зазорам и центрированию питательных насосов и их приводов	Формуляры	+		+		+
Опробование питательных насосов на разгрузку	Запись в монтажном журнале	+		+		
Данные по зазорам и центрированию циркуляционных насосов	Формуляры	+		+		+
Осмотр водоподводящего канала и приемного колодца циркуляционных насосов	Запись в монтажном журнале	+	+			+
Опробование циркуляционных насосов с подачей воды в конденсатор и проверкой плотности водоводов и крышек конденсатора	То же	+				+
4. Станционное оборудование						
Окончание монтажа и гидравлическое испытание деаэраторов, питательных, конденсатных, и дренажных баков, подогревателей сетевой воды и испарителей	Акт	+				+
III. Пусковые работы						
Заливка масла в бак и прокачка его по масляной системе турбины и генератора	Запись в монтажном журнале	+				+
Испытание плотности собранного генератора совместно с системой водородного охлаждения	Акт	+		+		+
Промывка системы водяного охлаждения обмоток генератора конденсатом	»	+		+		+

Наименование узлов	Форма документации	Организации, подписывающие данную форму				
		Монтажная	Строительная	Завод-поставщик	Наладочная	Заказчик
Промывка трубопроводов основного конденсата	Запись в монтажном журнале	+			+	+
Водная и кислотная промывка питательного тракта	Акт	+			+	+
Продувка главного паропровода и паропроводов промежуточного перегрева	»	+			+	+
Продувка паропроводов к эжекторам и уплотнениям	»	+			+	+
Проверка защиты турбины	»	+		+		+
Опробование работы турбогенератора на холостом ходу и испытание автоматов безопасности	»	+		+		+
Комплексное опробование турбоагрегата под нагрузкой	Акт и приложения к нему	+	+	+	+	+

и металлоконструкций для регенеративной установки; г) сооружение железнодорожных путей для подачи оборудования в машинный зал.

Своевременное и качественное выполнение подготовительных работ к монтажу является важным фактором для нормального и успешного ведения самого монтажа. Основные из них следующие: а) испытание и сдача в эксплуатацию мостового крана; б) оснащение монтажной площадки верстаками, стеллажами для хранения деталей турбинного оборудования и специального инструмента, сверлильным и наждачным станками; в) обеспечение машинного зала электроосвещением (низковольтным и высоковольтным), разводкой кислорода, ацетилена, сжатого воздуха, электросварочными постами; г) изготовление специальных приспособлений, инструментов, стропов; д) приобретение и подготовка слесарно-монтажных и измерительных инструментов и вспомогательных материалов; е) проверка, согласно упаковочным ведомостям, комплектности поступившего на монтаж оборудования. Номенклатура инструментов и вспомогательных материалов, потребных для монтажных работ разработана на основе большого опыта [1]. Например, для монтажа турбины К-300-240 применяется около 150 наименований различных инструментов.

Организацию монтажного участка следует начинать с устройства контор для технического персонала, бытовых помещений,

кладовых для хранения иструментов, мелкого оборудования и вспомогательных материалов. При выборе мест для этих помещений, а также при организации специализированных рабочих мест (площадок для ревизии арматуры, мест для установки электросварочных аппаратов, станков и т. п.) следует руководствоваться общим проектом установки турбогенератора, для того

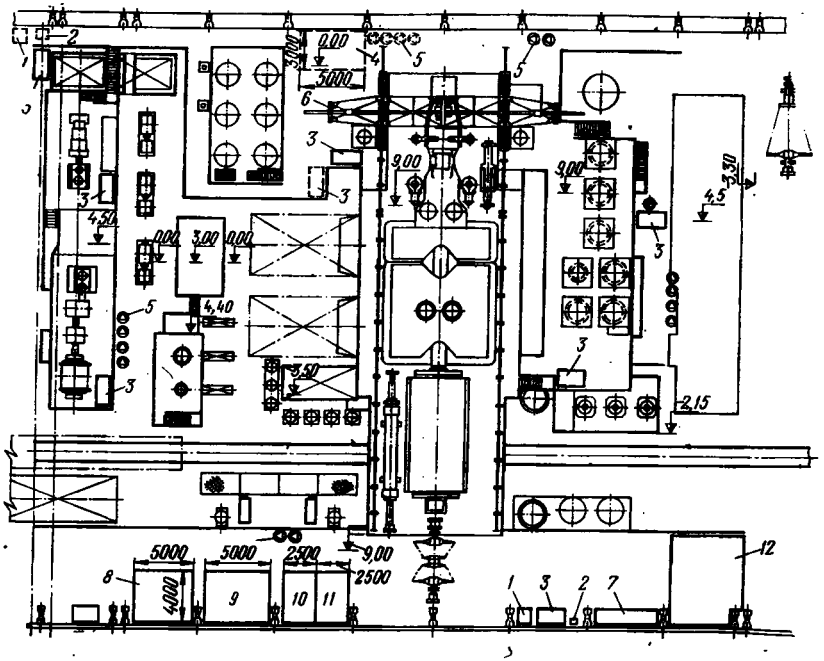


Рис. 242. Схема размещения оборудования и рабочих мест в машинном зале при монтаже турбины:

1 — сверлильные станки; *2* — заточной станок; *3* — слесарные верстаки; *4* — инструментальная кладовая; *5* — электросварочные трансформаторы; *6* — двухконсольный вспомогательный кран; *7* — токарный станок; *8* — кладовая для хранения мелких деталей и вспомогательных материалов; *9* — контора инженерно-технических работников цеха; *10* — помещение шеф-персонала; *11* — контора старшего производителя работ; *12* — бытовые помещения

чтобы не занять места, предназначенные для установки элементов основного турбинного оборудования и прокладки трубопроводов.

Примерный план размещения монтажного участка с указанием мест расположения основного оборудования показан на рис. 242.

Руководитель работ должен подробно ознакомиться с проектом установки и ознакомить с ним всех исполнителей, а также принять меры к своевременному обеспечению рабочих мест вспомогательными материалами, инструментом, подъемно-транспорт-

ными средствами и другими предметами, необходимыми для выполнения работ.

Основным механизмом для производства монтажных работ в машинном зале является мостовой кран. Грузоподъемность крана определяется весом статора генератора. При очень большом единичном весе деталей устанавливают два крана с половинной грузоподъемностью каждого. При подъеме тяжелой детали пользуются обоими кранами вместе, применяя специальную траверсу.

Применение вспомогательных такелажных средств определяется проектом организации работ, но следует иметь в виду, что применение консольных кранов грузоподъемностью до 3 т с зоной действия над фундаментом турбины, с целью освобождения от мелкой загрузки мощного мостового крана, является необходимым.

Подача оборудования в зону действия мостового крана производится по железнодорожным путям. При распаковке оборудования производится его осмотр. При обнаружении дефектов составляется акт, устанавливающий их характер и способы устранения.

Консервация и промывка поступившего на монтаж оборудования и отдельных деталей производится керосином; обтирка фундаментных рам, цилиндров, диафрагм выполняется хлопчатобумажными концами и ветошью, а деталей регулирования, парораспределения, вкладышей подшипников и других точных механизмов — только подрубленными салфетками.

При разборке узлов оборудования ведется тщательное наблюдение за маркировкой деталей и замеряется их взаимное положение. При отсутствии маркировки необходимо ставить нужные метки.

Трубы диаметром свыше 100 мм поставляются на монтаж в готовом виде, т. е. согнутые в соответствии с чертежами. Трубы диаметром менее 100 мм можно поставлять прямыми (метражом). Их гнутье осуществляется по месту на монтажной площадке.

Монтаж трубопроводов турбинной установки производится на специально оборудованной трубогибочной площадке в соответствии с технологическими указаниями, изложенными в «Инструкции по монтажу трубопроводов электрических станций», выпущенной институтом «Оргэнергострой».

Основным документом, согласно которому организуются и ведутся монтажные работы, являются проект производства работ. Одновременно используются типовые технологические карты, а также заводские инструкции с техническими указаниями по наиболее важным моментам организации монтажных и сборочных работ.

Перед началом работ и постоянно в процессе монтажа всего турбинного оборудования должны тщательно соблюдаться все требования, обеспечивающие безопасное ведение работ, в соот-

ветствии с утвержденными в установленном порядке инструкциями. Со всеми работниками должен быть проведен необходимый инструктаж по технике безопасности при монтаже крупных и тяжелых элементов машин.

Огневые работы должны производиться только с разрешения пожарной охраны; деревянные конструкции, леса, масла, горючие жидкости должны предохраняться от сварочных искр; промасленные концы и отработанный обтирочный материал должны быть удалены, а до удаления из помещения храниться в металлических ящиках. Нужно проявлять особую осторожность при работе с нитрокрасками, ацетиленом, бензином и другими огнеопасными жидкостями. Рабочие места должны быть оборудованы противопожарным инвентарем (огнетушителями, гидрантами, пожарными рукавами, ящиками с песком).

Глава XXVI. ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО МОНТАЖУ ТУРБИН

1. Подготовка фундамента к монтажу

Фундаменты по своей конструкции делятся на стеновые и рамные (рис. 243). Для установки крупных турбогенераторов широко применяются фундаменты смешанного типа, в которых стойки вытянуты в продольном направлении в виде коротких стен.

Каждый фундамент под турбогенератор после изготовления и освобождения его от опалубки, до начала монтажа, должен быть осмотрен и проверен. Результаты проверки фиксируются актами, являющимися основанием для начала монтажа. В проверку фундамента входит определение качества фундамента в отношении его прочности и монолитности и соответствия размеров фундамента монтажным чертежам.

Качественно изготовленный и выстоявшийся в течение примерно трех недель фундамент должен представлять собой единую монолитную массу, в которой не имеется отдельных, составляющих масс бетона, фракций щебня и раствора; в нем не должно быть наружных дефектов, раковин, пустот, трещин или обнаженной арматуры, кроме тех мест, где это предусмотрено проектом.

В процессе проверки годности фундамента необходимо установить правильность: а) расположения фундамента относительно здания и фундаментов соседних турбогенераторов; б) размеров фундамента по отношению к собственным продольной и поперечной осям; в) заложения колодцев для фундаментных болтов по отношению к осям фундамента; г) высотных отметок опорных плоскостей фундамента под фундаментные рамы турбины и генератора; д) высот фундамента от уровня пола конденсацион-

ного помещения; е) расположения фундаментов под вспомогательное оборудование. Контроль размеров производится от струн, натянутых по осям основных фундаментов.

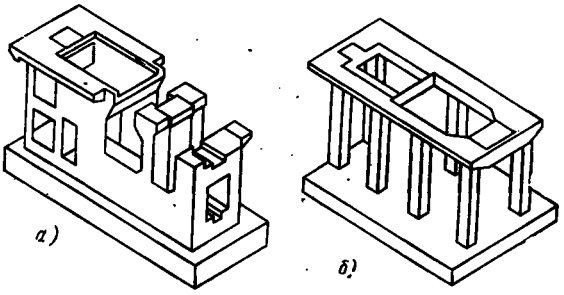


Рис. 243. Фундаменты.
а — стеновой конструкции; *б* — рамной конструкции

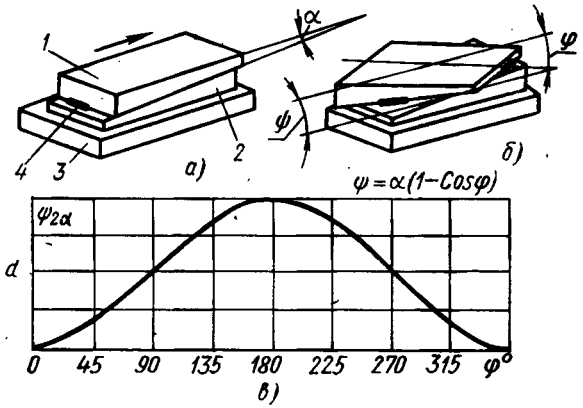


Рис. 244. Схема установки парных клиньев:
а — изменение высоты путем сдвига клиньев; *б* — изменение угла между опорными поверхностями путем поворота одного клина; *в* — зависимость величины двугранного угла ψ между опорными поверхностями от угла поворота φ (α — двугранный угол каждого клина; ψ — двугранный угол между наружными поверхностями парного клина; φ — угол поворота одного клина по отношению к другому); *1* — верхний клин; *2* — нижний клин; *3* — плоская подкладка; *4* — прихватка клиньев друг к другу электросваркой после окончания выверки цилиндров

Применяются различные способы установки турбинных агрегатов на фундаменты. В соответствии с этим фундаменты сооружаются:

а) приспособленные для установки опор фундаментных рам, состоящих из плоских подкладок с парными клиньями (рис. 244) непосредственно на бетон;

б) с залитыми в бетон закладными плитами (рис. 245), на которые устанавливаются постоянные подкладки под фундаментные рамы, как это показано на рис. 246.

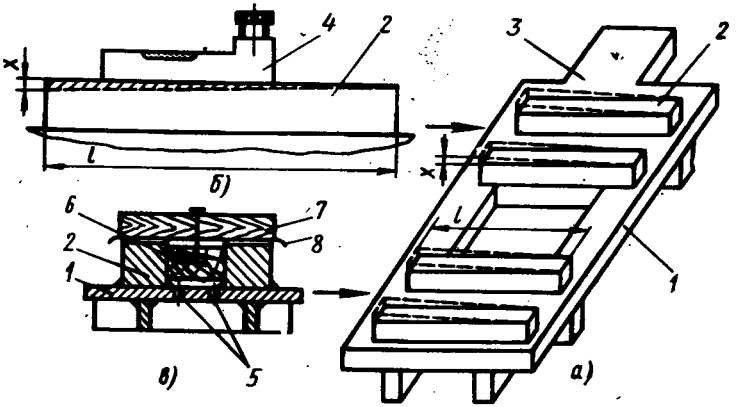


Рис. 245. Закладная плита и проверка ее опорных брусьев:

а — закладная плита; *б* — проверка продольного уклона опорных брусьев; *в* — защита окончательно обработанных брусьев; *1* — закладная плита; *2* — опорный брус; *3* — место для опоры динамометра; *4* — уровень типа «Геологоразведка»; *5* — отверстие для выхода воздуха; *6* — распорный деревянный брус; *7* — обрезные доски; *8* — промасляная бумага; стрелками указано направление установки постоянных подкладок

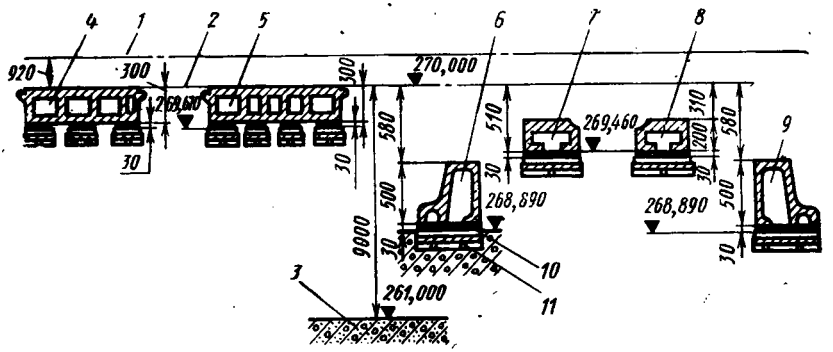


Рис. 246. Схема высотных отметок закладных плит турбины К-200-130:

1 — ось турбины; *2* — уровень пола машинного зала; *3* — уровень пола конденсационного помещения; *4* — фундаментная рама корпуса переднего подшипника; *5* — рама корпуса подшипника № 2; *6* — передняя рама цилиндра; *7* — передняя рама средней части цилиндра; *8* — задняя рама средней части цилиндра; *9* — задняя рама цилиндра; *10* — постоянные подкладки; *11* — закладные плиты

Наиболее простым является первый способ, применяемый ХТГЗ, КТЗ и НЗЛ. На закладных плитах устанавливают фундаментные рамы ЛМЗ и ТМЗ. Имеются и другие способы установки турбин на фундаменты, не получившие, однако, применения в практике наших заводов.

Будучи равноценными по своим эксплуатационным качествам, что подтверждается многолетней практикой применения каждого из них, эти способы различаются между собой по трудоемкости. Например, трудоемкость установки одной прокладки по первому способу составляет 13,5 человеко-часов, а по второму — 24,3 человеко-часов.

Если фундамент выполнен по первому способу и опорой для фундаментных рам служат плоские подкладки с парными клиньями (см. рис. 244), то подготовка фундамента под установку фундаментных рам (на ряде заводов их называют также фундаментными плитами) состоит в следующем.

Из листовой стали толщиной 0,8—1,0 мм изготовляют шаблоны с контуром, соответствующим контуру опорных поверхностей фундаментных рам. Эти шаблоны раскладывают на фундаменте согласно чертежу установки рам и размечают по ним мелом места расположения подкладок (с парными клиньями), на которые будут опираться фундаментные рамы.

Размеченные места обрабатывают зубилом, удаляя все неровности, после чего притирают их стальными плитками так, чтобы подкладки плотно ложились на бетон. Обработанные места должны располагаться горизонтально с точностью 3—5 делений уровня «Геологоразведка». Длина и ширина обработанных мест должны быть на 20—30 мм больше, чем у подкладок.

Подготовка фундамента с закладными плитами является более сложной и требует особой тщательности выполнения. От того, насколько правильно выполнена установка закладных плит, зависит в дальнейшем трудоемкость и качество монтажа цилиндров. Поэтому, как правило, монтаж этих плит под заливку в процессе изготовления фундамента в большинстве случаев выполняется не строителями, а монтажным персоналом турбинного цеха с соблюдением всех технических требований к расположению закладных плит как в плане, так и по высотным отметкам.

Как видно из рис. 245, опорные поверхности закладных плит должны иметь уклон в ту сторону, откуда будут заводиться постоянные подкладки. Величина этого уклона должна составлять от 10 до 20 делений уровня типа «Геологоразведка». При этом уклон всех опорных брусьев должен быть одинаковым, что достигается путем наклона всей закладной плиты. При этом наклон плиты в поперечном направлении не должен превышать 3—5 делений уровня.

Закладные плиты устанавливают одним из двух способов: группами при помощи специальных вспомогательных рам или каждую в отдельности с помощью четырех установочных шпилек. Соответственно подготовляют фундамент и его арматуру.

Для установки плит первым способом изготовляют вспомогательные рамы из двутавровых или швеллерных балок (рис. 247, *а*, *б*). Плиты крепят к рамам после распланирования их на рамах

в соответствии с заводскими чертежами и чертежами фундаментов. Крепление осуществляют или электросваркой (рис. 247, *а*), или болтами (рис. 247, *б*), с выдерживанием необходимых уклонов; отношение $x : l \approx 0{,}001 \div 0{,}002$ (см. рис. 245). При креплении болтами облегчается регулирование требуемого уклона и достижение правильного взаимного расположения плит. На

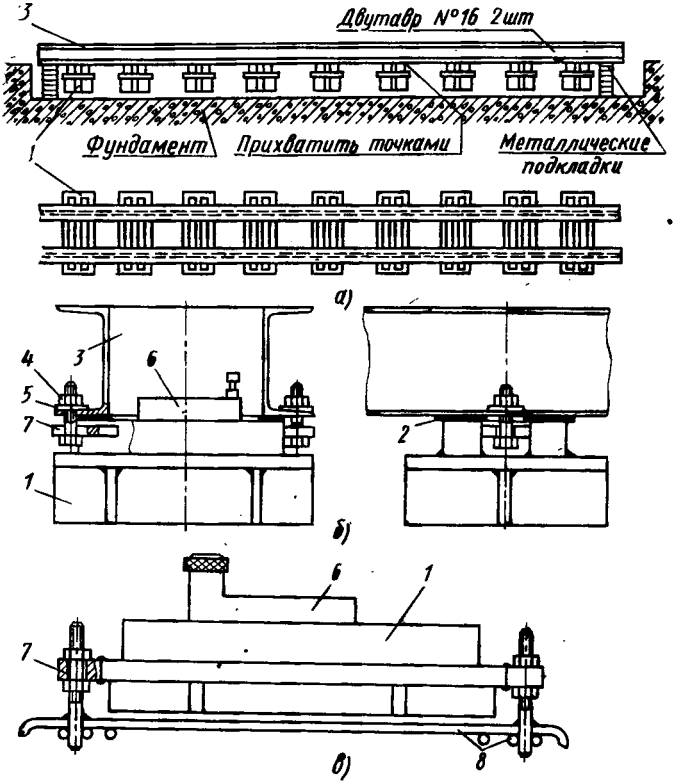


Рис. 247. Схема установки закладных плит:

а, *б* — на вспомогательной раме; *в* — на каркасе фундамента; *1* — закладная плита; *2* — подкладка; *3* — вспомогательная рама; *4* — болт с гайкой; *5* — шайба клиновая; *6* — уровень; *7* — планка; *8* — арматура фундамента

рис. 247, *в* показано крепление закладных плит к каркасу фундамента при их установке.

Положение закладных плит по высотным отметкам выверяют подкладками под вспомогательные рамы (см. рис. 247, *а*) после чего рамы, для предохранения их от сдвига при заливке закладных плит бетоном, крепят к каркасу фундамента электросваркой.

Через 7—10 дней после бетонирования закладных плит места прихватки рам к арматуре каркаса фундамента срезают автоге-

ном и рамы удаляют. В дальнейшем они используются для установки закладных плит на других фундаментах. Поверхности плит пришабривают и закрывают временно предохранительными деревянными щитками (рис. 245, *в*).

2. Сборка и монтаж конденсатора

Конденсаторы турбин мощностью до 50 МВт поставляются на монтаж в сборе с трубками. Переходная часть от турбины к конденсатору и конденсатосборник привариваются в процессе

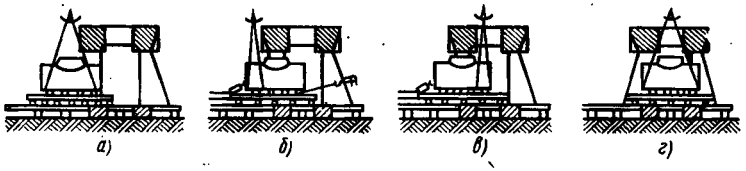


Рис. 248. Схема установки конденсатора в проем фундамента:

а — первый этап — до касания тросом верхнего пояса; *б* — второй этап — перехват и подтягивание лебедкой; *в* — третий этап — перехват с подтягиванием; *г* — четвертый этап — окончательная установка

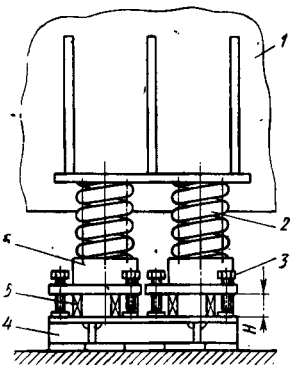


Рис. 249. Установка конденсатора на пружинные опоры:

1 — корпус конденсатора; *2* — пружина; *3* — установочный болт; *4* — рама пружин; *5* — установочная планка; *6* — стакан

монтажа: первая — до заводки конденсатора в проем фундамента, а второй — после заводки.

Проверка фундамента под монтаж конденсатора производится при приемке всего фундамента. Перед заводкой особо тщательно надо проверить размеры проема. Нельзя допускать, чтобы во время заводки пришлось разделывать проем. Все разделки, если они требуются, необходимо произвести заранее.

Заводка конденсатора в проем фундамента производится методом последовательного переноса ветвей стропов через верхний пояс фундамента (рис. 248). В отечественных конструкциях конденсаторы устанавливаются на пружинные опоры (рис. 249). До заводки конденсатора надо проверить чистоту поверхностей опорных плит (забетонированных в фундамент) под пружинные опоры конденсатора.

Перед установкой пружин необходимо произвести ревизию пружин и стаканов и замерить размеры пружин в свободном состоянии (по высоте), записав фактические размеры в формуляр.

После заводки конденсатора вынимают катки из-под его лап и устанавливают его на пружинные опоры. Положение конденсатора по высоте регулируется с помощью установочных болтов.

Первоначально конденсатор устанавливают по высоте с таким расчетом, чтобы до кромки выхлопного патрубка турбины оставалось от 40 до 50 мм. Это необходимо, чтобы не мешать центровке турбины. Вторично производят обмер высоты пружин. Требуется, чтобы разница в усадке пружин была одинаковой — в пределах ±1 мм. Эти размеры также заносят в формуляр.

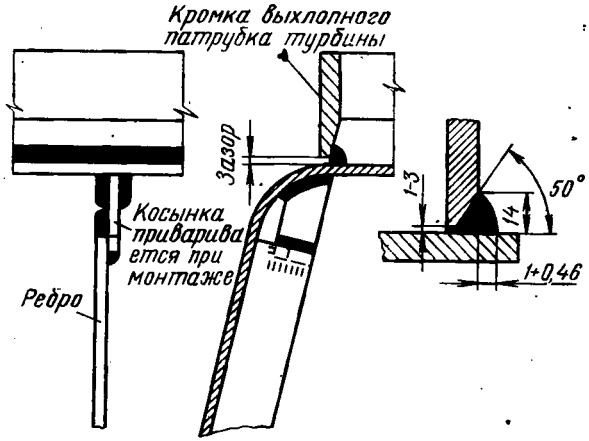


Рис. 250. Соединение выхлопного патрубка цилиндра турбины с конденсатором посредством сварки

Окончательную установку конденсатора по высоте производят после окончания центровки турбины. Соединение конденсатора с турбиной в современных конструкциях осуществляют электросваркой (рис. 250).

Конденсатор поднимают на отжимных болтах до образования зазора 1—3 мм между кромкой цилиндра и конденсатором. Проверяют зазор. При необходимости рихтуют кромку кувалдой с местным подогревом. Производят приварку кромок и косынок.

После приварки следует: а) убедиться, что высота пружин, занесенная в формуляр, не изменилась; б) произвести замеры размера *H* (см. рис. 249) для изготовления установочных планок (под каждой пружиной устанавливается по три планки); в) установить планки на место и ослабить болты; г) установить водоуказательный прибор [1].

Гидравлическое испытание на плотность швов производится наливом воды одновременно с проверкой на плотность всей вакуумной системы. Опробование плотности со стороны охлаждающей воды производится одновременно с испытанием систем водоснабжения.

В современных крупных турбинах большой единичной мощности конденсаторы по своим габаритам становятся не транспортабельными и поэтому поступают на монтаж в виде отдельных частей (блоков), которые собираются и свариваются при монтаже непосредственно в проеме фундамента. Например, конденсатор турбины К-300-240 поступает на монтаж в виде 20 блоков (рис. 251). Блоки корпуса образуются при разрезании его в про-

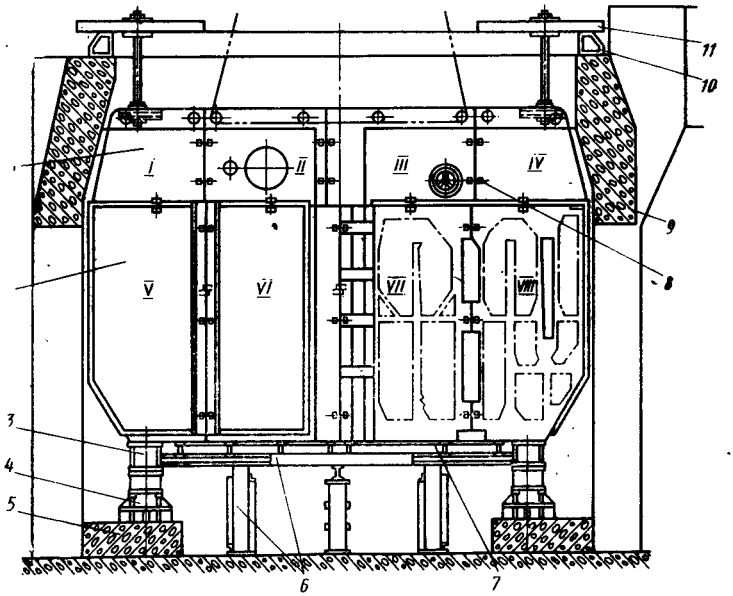


Рис. 251. Схема установки и сборки корпуса конденсатора турбины К-300-240 в проеме фундамента:

I — VIII — номера блоков корпуса; *1* — блоки горловины; *2* — блоки нижней части корпуса; *3* — опорные балки корпуса; *4* — рамы пружин; *5* — бетонные опоры; *6* — временные металлоконструкции; *7* — плаз; *8* — приспособления для стыковки блоков; *9* — фундамент турбоагрегата; *10* — фундаментная рама ЦНД; *11* — приспособление для подвески горловины

дольном и поперечном направлениях. Горловина разрезана на четыре продольных блока. Корпус конденсатора располагается на специальных балках, опирающихся на пружинные опоры. Высотное положение балок изменяется путем установки стальных подкладок необходимой толщины между бетонными опорами и рамами пружин.

Стыковка блоков производится в определенной последовательности, что указывается в технологической документации. Для облегчения стыковки блоков при сборке конденсатора в процессе монтажа на заводе около разъемов приваривают специальные планки-фиксаторы и приспособления (рис. 252), с помощью которых блоки могут быть стянуты между собой болтами. Более

подробно с процессом сборки корпуса конденсатора, а также с процессом установки и вальцовки конденсаторных трубок, можно познакомиться в специальной литературе [1].

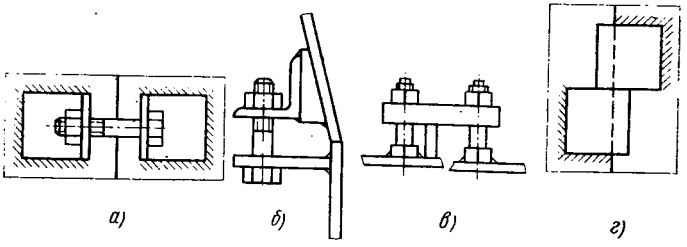


Рис. 252. Приспособления для стыковки блоков конденсаторов:
а — для стягивания разъемов; *б* — для стягивания горловины с корпусом; *в* — для выравнивания кромок листов; *г* — приварка планок-фиксаторов

3. Монтаж цилиндров турбин

Основной задачей, которая должна быть решена при монтаже турбины, является повторение с наибольшей точностью заводской сборки при выдерживании необходимых величин радиальных и осевых зазоров в проточной части и уплотнениях по формулярам. При блочной поставке турбин, например газовых, задача несколько упрощается [12].

Технологическая последовательность монтажа одноцилиндровой турбины складывается из следующих основных операций. Сначала по способу, принятому заводом-изготовителем, на фундаменте производят выверку нижней половины цилиндра. После того как цилиндр установлен в соответствии с данными формуляра сборки, выполненной на стенде завода, под фундаментные рамы цилиндра и корпуса переднего подшипника устанавливают ротор и производят центрирование его по расточкам концевых уплотнений. После этого выполняют центрирование диафрагм и обойм концевых уплотнений по борштанге или проверочному (калибровому) валу; замеряют зазоры в проточной части, концевых уплотнениях и уплотнениях диафрагм. Подсоединяют конденсатор. Вторично проверяют центровку и производят закрытие цилиндра. Затем выполняют подливку фундаментных рам раствором бетона. Собирают узлы регулирования в корпусе переднего подшипника и органы парораспределения, устанавливаемые на цилиндре. Закрывают корпусы подшипников, и наконец, наносят тепловую изоляцию цилиндра и устанавливают обшивку.

При монтаже двухцилиндровой турбины сначала устанавливают и выверяют цилиндр низкого давления, который принимают за базу при выверке цилиндра высокого давления. После

того как цилиндр низкого давления установлен на постоянные подкладки (парные клинья) и произведено центрирование его ротора по расточкам концевых уплотнений, устанавливают корпус переднего подшипника, нижнюю половину цилиндра высокого давления, ротор высокого давления и производят центрирование ротора по расточкам концевых уплотнений и муфте. Подсоединяют конденсатор. Проверяют, не сбилась ли центровка. После этого устанавливают постоянные подкладки (парные клинья) под фундаментные рамы корпусов переднего и среднего подшипников. Дальнейшие операции производят в том же порядке, что и для одноцилиндровой турбины.

Последовательность монтажа трехцилиндровой турбины в основном повторяет последовательность монтажа двухцилиндровой турбины. При этом постоянные подкладки (парные клинья) устанавливают под фундаментные рамы корпусов средних и переднего подшипников только после окончания последовательного центрирования роторов низкого, среднего и высокого давлений по муфтам, подсоединения конденсатора и вторичной проверки центровки.

4. Основные измерительные приборы, применяемые при монтаже

Динамометр. Основным средством измерения нагрузок, в частности реакций опор, являются динамометры (см. рис. 224). Погрешность измерений ими равна примерно 3%.

Перед тем как ввернуть динамометры в гнезда на фундаментных рамах или консольных лапах цилиндра, нужно установить на динамометры индикаторы, так чтобы их измерительные стержни уперлись в штоки и малые стрелки показывали 3—5 мм. Под штоки динамометров должны быть уложены каленые подкладки, входящие в комплект динамометров. При большой высоте боковых рам, превышающих высоту динамометров, пользуются специальными удлинителями или временными подставками (рис. 253).

Постепенно ввертывая динамометры в фундаментные рамы, нужно равномерно нагружать их до момента отделения рам от временных подкладок. При этом следует убедиться, что рамы турбины нигде не касаются их. Это определяется возможностью перемещения временных подкладок от руки. Для того чтобы во время выверки цилиндра его рамы не опустились на временные подкладки, последние следует удалить или уменьшить высоту клиновых домкратов (парных клиньев) на 2—3 мм.

Ввертывая динамометры в консольные лапы цилиндра, следует отделить лапы от поперечных шпонок на одинаковую величину в пределах 0,05—0,10 мм, что контролируется вспомогательными индикаторами (рис. 254). Изменение нагрузки на динамо-

метры можно производить только изменением толщины подкладок, установленных под рамой корпуса подшипника.

Вследствие явления гистерезиса (запаздывания реакции динамометра на изменение величины нагрузки), из-за которого одному и тому же показанию индикатора могут соответствовать разные нагрузки, необходимо при пользовании динамометрами устанавливать заданную величину нагрузки только путем постепенного ее увеличения без последующего снижения.

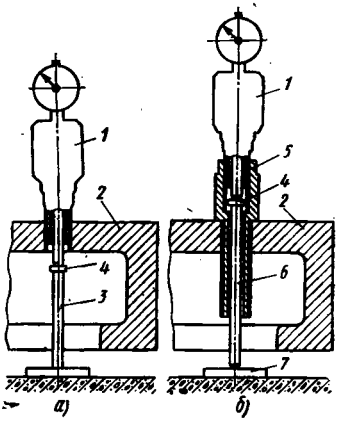


Рис. 253. Схема расположения динамометра на боковых рамах турбины:

а — с установкой подставки; *б* — с применением удлинителя; *1* — динамометр; *2* — рама; *3* — подставка; *4* — закаленная подкладка; *5* — удлинитель; *6* — шток удлинителя; *7* — опорная подкладка

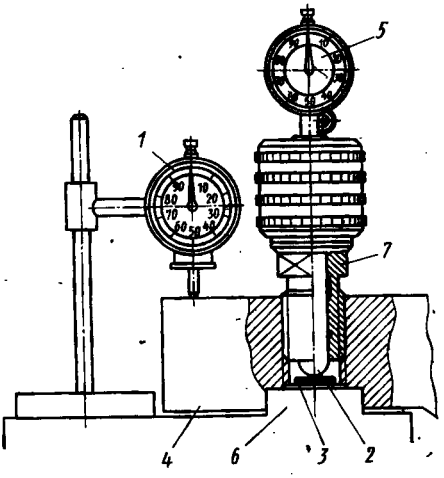


Рис. 254. Схема расположения динамометра на консольной лапе цилиндра:

1 — индикатор; *2* — шток динамометра; *3* — закаленная подкладка; *4* — консольная лапа; *5* — индикатор динамометра; *6* — поперечная шпонка; *7* — корпус динамометра

При выверке цилиндра турбины на динамометрах в процессе монтажа необходимо добиться следующих условий:

а) разность нагрузок у динамометров, установленных на одной опоре, не должна превышать 300 кгс (3 кН);

б) полученные при монтаже нагрузки не должны отличаться от нагрузок, полученных при стендовой сборке, более чем на 5%, при равной нагрузке симметрично расположенных динамометров.

Гидростатический уровень (рис. 255) применяется для определения относительных высотных отметок мест установки элементов оборудования турбин. Наличие микрометрических головок позволяет получить точность измерения таким уровнем в пределах 0,01—0,02 мм. Разность высот, измеряемая уровнем, не превышает 25 мм.

Гидростатический уровень может обеспечить достоверные показания только в том случае, если в его водяном шланге и ка-

налах отсутствует воздух. Поэтому для заливки гидростатического уровня рекомендуется применять чистый теплый конденсат, в котором содержание растворенного воздуха невелико. Для выявления пузырьков воздуха применяются прозрачные шланги.

Гидростатический уровень имеет высокую точность, однако он весьма чувствителен к разности температур в местах установки сосудов прибора, а попадание воздуха в водяной шланг прибора резко искажает его показания. Поэтому, чтобы избежать

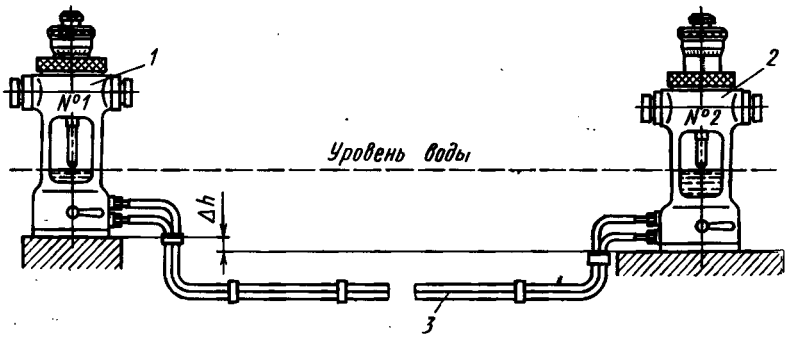


Рис. 255. Гидростатический уровень:
1, 2 — измерительные головки; *3* — шланги

случайных ошибок, измерение следует производить 2—3 раза. В случае большого разброса величин необходимо прекратить замеры и выяснить причину.

5. Установка и выверка фундаментных рам

Фундаментные рамы турбин большой мощности и габаритов состоят из отдельных частей, самостоятельно укрепляемых на фундаменте. Например, фундаментная рама двухцилиндровой турбины Т-50-130 с одним выхлопом имеет фундаментную раму заднего ЦНД, две фундаментные рамы передних ЦНД, раму корпуса средних подшипников, раму переднего подшипника.

Фундаментные рамы, как известно из предыдущего, устанавливают и выверяют на подкладках, которые кладут (см. рис. 246) между закладными плитами и фундаментными рамами. Количество подкладок выбирается из расчета нагрузки на них в пределах 250—400 Н/см² (25—40 кг/см²). Расстояние между подкладками выдерживается от 300 до 600 мм. Схема расстановки подкладок для турбины К-300-240 ЛМЗ, в качестве примера, показана на рис. 256.

Фундаментные рамы расставляют на клиновых домкратах, которые устанавливают по возможности близко от закладных плит. Задняя рама ЦНД выставляется на заданной высоте относительно уровня пола машинного зала. Все остальные рамы при-

центровываются к ней по уровню на временных подкладках и клиновых домкратах.

Подготовку фундаментных рам производят следующим образом: 1) фундаментную раму перекантовывают, и проверяют по

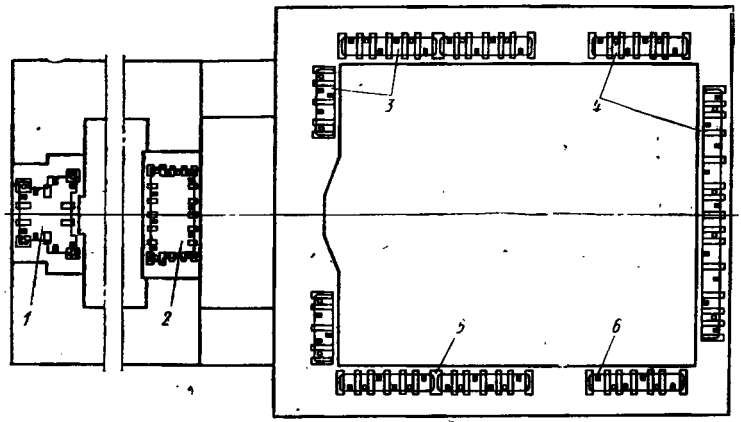


Рис. 256. Схема расположения закладных опорных плит и клиновых домкратов под фундаментными рамами турбины К-300-240:

1 — плита корпуса переднего подшипника; *2* — плита корпуса средних подшипников; *3* и *4* — плиты; *5* — условное обозначение закладной опорной плиты; *6* — условное обозначение клинового домкрата

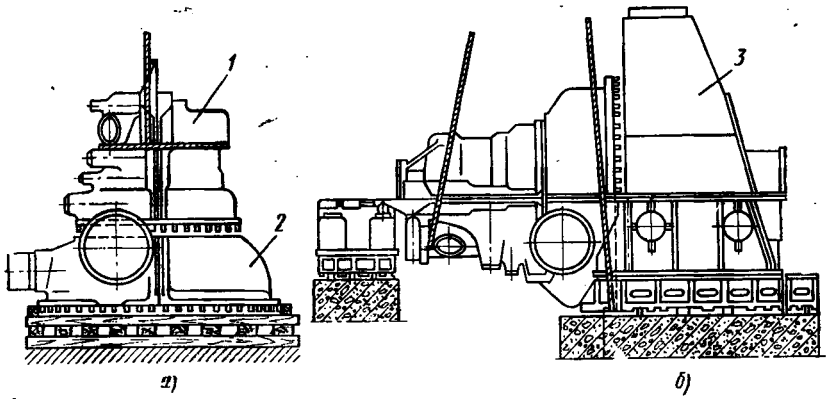


Рис. 257. Сборка цилиндра турбины К-300-240:

а — сборка блока передней и средней частей цилиндра; *б* — присоединение блока к «кольцу» выхлопной части; *1*, *2* — передняя и средняя части цилиндра; *3* — выхлопная часть

шаблровочной плите места под установку постоянных подкладок; 2) проверяют чистоту внутренних полостей фундаментных рам на отсутствие масла и краски, что необходимо для лучшего сцепления их с бетоном; 3) проверяют прилегание фундаментных рам к опорным поверхностям цилиндров и подшипников (пластина

щупа 0, 05 мм не должна проходить в стык сопряженных плоскостей; допускается прохождение щупа лишь на отдельных участках периметра стыка, общая длина которых не должна превышать 20% длины периметра, при условии плотного прилегания по углам); 4) после проверки рамы крепят к корпусам и вместе с корпусами цилиндров и подшипников устанавливают на клиновые домкраты.

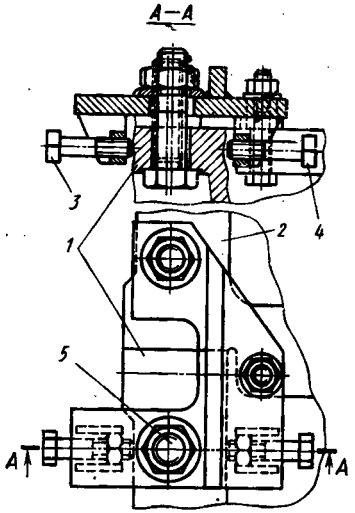


Рис. 258. Приспособление для сборки вертикального стыка цилиндра среднего и низкого давлений турбины К-300-240:

1, 2 — корпусы цилиндров; *3, 4* — болты, регулирующие положение стыка в поперечном направлении; 5 — болт, регулирующий положение стыка в вертикальном направлении

Цилиндр одноцилиндровой турбины состоит из трех частей— выхлопной, средней и передней. Эти части поставляются на монтаж разобранными по вертикальным разъемам, а наиболее крупные (например, выхлопные) — и по горизонтальному разъему.

Сначала ведут сборку нижних половин цилиндров по вертикальным разъемам. При соединении частей руководствуются данными заводских формуляров. Отклонение от этих данных допускается не более ±0,05 мм. Верхние половины собирают по нижним.

Сборку цилиндров начинают со стыковки нижних половин средней части ЦНД с передней в вертикальном положении (рис. 257, *а*). Проверяют плотность прилегания фланцев. При необходимости фланцы шабрят. На стык наносят мастику. При соединении контролируют соответствие заводским формулярам.

Следующий этап — сборка передней и средней частей цилиндра с выхлопной (рис. 257, *б*). При этом желательно, чтобы выхлопная часть была уже установлена на фундаменте, выверена по высотным отметкам и закреплена фундаментными болтами. Блок передней и средней частей цилиндра подсоединяют к выхлопной с соблюдением требований заводского формуляра и обеспечением необходимой плотности стыка. При сборке пользуются специальным приспособлением (рис. 258), позволяющим отрегулировать взаимные повороты частей цилиндра. Перед окончательным соединением частей на плоскости стыков наносят мастику.

Верхние половины цилиндров укладывают на нижние и соединяют по горизонтальному разъему. Проверяют плотность вертикальных разъемов. Затем горизонтальный разъем освобождают и соединяют вертикальные разъемы окончательно.

На рис. 259 показана сборка ЦНД турбины К-200-130. Вначале передняя и задняя выхлопные части устанавливаются на фундамент. Далее средняя часть цилиндра заводится с помощью подъемного крана между передней и задней частями и стыкуется на контрольных штифтах (с затяжкой гаек) с передней частью без применения мастики. При этом проверяется совпадение отверстий под контрольные болты и плотность фланцев вертикального разъема пластиной щупа толщиной 0,05 мм. После разбал-

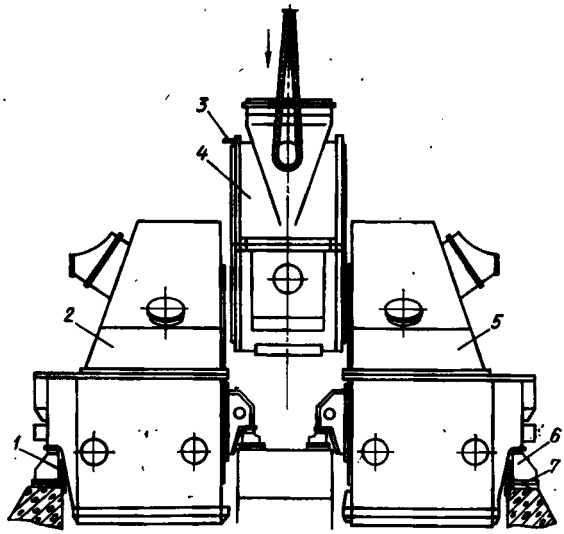


Рис. 259. Сборка цилиндра турбины К-200-130:
1 — опалубка; 2 — передняя часть цилиндра; 3 — шпильки; 4 — средняя часть; 5 — задняя часть; 6 — фундаментная рама; 7 — клиновой домкрат

чивания вертикального разъема средняя часть соединяется с задней частью цилиндра низкого давления так же, как и с передней. Если при этих проверках нельзя раздвинуть переднюю и заднюю части цилиндра низкого давления на фундаменте, чтобы между ними вставить среднюю, необходимо из одного вертикального фланца вывернуть шпильки (на рис. 259 шпильки вывернуты в правой стороне) и завернуть их обратно после установки средней части через отверстия во фланце цилиндра низкого давления.

При такой сборке отдельно левой и правой выхлопных частей цилиндра со средней его частью необходимое перемещение их по высоте достигается при помощи клиновых домкратов под фундаментными рамами или при помощи временных прокладок. После нанесения мастики толщиной 0,3—0,5 мм и установки контрольных штифтов поочередно на каждый вертикальный фланец производится сборка всего цилиндра.

6. Установка и выверка нижних половин ЦНД, ЦВД и корпусов подшипников

Подготовка корпусов подшипников к установке включает проверку их плотности керосином (для чугунных корпусов), контроль сопряжения основания с фундаментной рамой по краске и контроль пригонки шпонок.

Подготовка фундаментных рам включает проверку плотности их сопряжения по опорным поверхностям с корпусами турбины и подшипников. Площадки под установку постоянных прокладок (парных клиньев и др.) должны быть пришабрены с проверкой по контрольной плите. В шпоночных соединениях должны быть выдержаны требуемые зазоры. Фундаментные рамы должны быть обезжирены и очищены от консервирующей краски.

Подготовка фиксирующих шпонок включает контроль пригонки их по месту установки, наличие маркировок, прилегание к площадкам корпусов подшипников.

Подготовка цилиндров включает проверку шпоночных пазов, пригонку фундаментных рам (в ЦНД) и совпадения плоскости разъема с осью расточки.

У роторов проверяют качество шеек, торцовых поверхностей соединительных муфт, всего облопачивания, радиальное и аксиальное биения рабочих колес и упорного гребня.

Результаты проверки сверяют с данными, записанными в формуляры.

Подготовка вкладышей должна обеспечить: а) высокое качество рабочей поверхности баббита; б) чистоту маслоподводящих каналов; в) качественную пригонку опорных подушек к пазам вкладыша и к расточке корпусов подшипников; г) качество сопряжения шаровых поверхностей опорно-упорного вкладыша и обоймы; д) качественное прилегание по краске шеек роторов и определенную величину масляных зазоров; е) качественное прилегание по краске упорных колодок; ж) совпадение маслоподводящих каналов во вкладышах и корпусах подшипников; з) наличие необходимых маркировок.

Произведенные замеры необходимо сверить с замерами, указанными в формуляре.

Установку корпусов цилиндров низкого давления и подшипников на фундамент производят в сборе с фундаментными рамами и подвешенными к ним фундаментными болтами. Под рамы подводят клиновые домкраты (см., например, рис. 256). Количество клиновых домкратов определяется технологией монтажа. Устанавливают их возле мест постоянных подкладок. Дальнейшие работы по центрированию корпусов и роторов производят аналогично сборке их на заводском стенде с использованием динамометров и гидростатических уровней, добиваясь максимального повторения результатов заводской сборки в соответствии с записями в заводских формулярах.

7. Установка постоянных подкладок

Заготовки постоянных подкладок изготовляют до начала монтажа турбин и обрабатывают их с припуском по толщине до 10 мм.

Установку постоянных подкладок выполняют после окончательной центровки турбины и подсоединения конденсатора. Все подкладки маркируют номерами мест их установки и обрабатывают по замерам с соответствующих мест.

Замеры выполняют с помощью приспособления, показанного на рис. 260. Измерительный штифт *1* приспособления находится под действием пружины. При заведении приспособления в гнездо для постоянной прокладки штифт пружиной поджимается к верхней стенке. В рукоятке *2* имеется отверстие с резьбой, в которое ввинчен винт *4*, оканчивающийся воротком *3*. Положение измерительного штифта фиксируется поворотом винта. Размер *a* после выемки приспособления из гнезда измеряется микрометром. Соответствующие размеры надо определить во всех четырех углах гнезда и нанести на эскиз подкладки. Обработку подкладок производят на токарном станке в специальном приспособлении, позволяющем выставить заготовку подкладки с необходимыми уклонами, в соответствии с произведенными замерами.

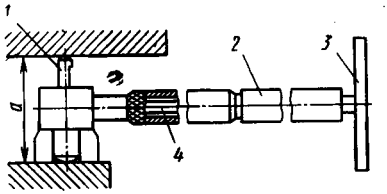


Рис. 260. Приспособление для измерения толщины постоянной подкладки

Практически точность обработки подкладки на токарном станке не превышает 0,04—0,05 мм, поэтому изготовление ее производится с плюсовым допуском в 0,05 мм.

Обработанная на станке поверхность подкладок должна быть пришабрена по контрольной плите, после чего подкладки подгоняются шабрением уже по месту. Для удобства установки и удаления подкладок к ним приваривают ручки длиной 200—500 мм из стального прутка диаметром 8—10 мм. Подкладки устанавливают в гнездо и доводят до места легкими ударами молотка. При этом следят, чтобы не нарушалась плотность установки соседних подкладок.

Фундаментные болты при установке подкладок должны быть надежно поджаты.

После установки постоянных подкладок производится проверка, которая включает контроль надежности крепления фундаментных рам к фундаменту, плотности прилегания корпусов подшипников и опор цилиндров к фундаментным рамам, а также консольных лап цилиндра к поперечным шпонкам и соответствия установки цилиндров и центровки роторов данным формуляров, составленных до установки подкладок. Данные проверки

также заносят в формуляр. После проверки прокладки прихватывают электросваркой к закладным плитам.

8. Подливка фундаментных рам

Подливку фундаментных рам производит строительная организация по заявке и под наблюдением монтажной организации. Крышки турбины во время подливки должны быть закрытыми.

Подготовка фундамента под подливку состоит из проверки наличия во всех отсеках рам специальных отверстий для заливки раствора внутрь рам и для выхода воздуха, а также тщательной очистки поверхности бетона под фундаментными рамами от мусора и масла, продувки ее сжатым воздухом и промывки водой. После промывки воду из отверстий под фундаментные болты необходимо удалить.

Подготовка опалубки требует соблюдения следующих условий: опалубка должна быть надежно закреплена, не иметь щелей и находиться на расстоянии не менее 100—150 мм от края фундаментных рам. По высоте опалубка делается на 20—30 мм выше нормального уровня заливки. Там, где опалубка прилегает к бетону не плотно, образовавшиеся щели уплотняют паклей.

Высота заливки фундаментных рам определяется чертежом. Обычно она делается не менее $^3/_4$ высоты фундаментных рам. Во внутренней полости рам бетон должен быть на одном уровне с наружной заливкой.

Подливку следует производить быстро, без перерывов. В первую очередь надо подливать колодцы для болтов, затем зазоры между рамами и фундаментом и в последнюю очередь внутренние полости рам. Рамы следует подливать с двух сторон, а по двум другим сторонам контролировать заполнение их бетоном. Уплотнение бетона при подливке должно производиться электровибратором, а в местах, недоступных для электровибратора,— штыкованием вручную.

По окончании схватывания бетон следует поливать водой и при этом следить, чтобы вода не попала на трущиеся поверхности фундаментных рам.

Для приготовления рабочих растворов бетона рекомендуется применение:

а) портландского или глиноземного цемента марки 300—400;
б) гравия или щебня мелкого — зерно 5—15 мм;
в) песка крупного.

До окончания выстаивания бетона никаких монтажных работ, связанных с вращением ротора и изменением нагрузок, производить нельзя. Время полного затвердения бетона, в зависимости от качества материала (сорта) и температурных условий окружающей среды, — 18—27 дней. Турбину можно запускать только после истечения указанного срока.

Прочность пробных бетонных кубиков, отлитых во время подливки рам для испытания на раздавливание, должна быть в пределах: 170—200 кгс/см² после 28 дней и 65% этой величины через 7 дней.

9. Краткие сведения о процессе монтажа генератора

Проверка фундамента генератора производится одновременно с проверкой фундамента всей турбоустановки.

До начала монтажа генератора следует изготовить по чертежам завода-поставщика парные клинья (см. рис. 244, *б*), подкладки под парные клинья в количестве, определяемом данными нивелировки фундамента, и плитки под фундаментную раму возбудителя.

Фундаментные рамы статора и возбудителя устанавливают на фундаменте на парные клинья с добавлением необходимого количества подкладок, но не более трех. Изменяя положение парных клиньев, выверяют фундаментные рамы по высотным отметкам и, одновременно, по продольной и поперечной осям фундамента. Устанавливают статор на фундаментные рамы и центруют его в отношении продольной оси фундамента по струне.

Следует иметь в виду, что эта центровка является предварительной, так как окончательно статор центруется относительно ротора генератора после его прицентровки к ротору турбины. Центровку ведут по величине кольцевого зазора между железом статора и ротора, замеренного в четырех точках, расположенных под углом 90° друг к другу как со стороны турбины, так и со стороны возбудителя. Величина зазора не должна отличаться от средней замеренной величины более чем на 1 мм.

Наиболее сложной и ответственной операцией является заводка ротора в статор. Положения ротора при заводке показаны на рис. 261. Заводом поставляется на монтаж вместе с генератором комплект такелажных приспособлений для заводки ротора в статор: специальные тележки *3* и *4*, рельсы *2*, стальной лист *5* и деревянные рейки на бочку ротора для защиты ее от повреждения тросами.

До заводки ротора в статор необходимо:

а) подготовить опорную балку *10* из двутавра № 50 длиной 5 м;

б) уложить в статор на подкладках из картона стальной лист *5* и привязать его тросом диаметром 7—8 мм к болтам заднего фланца статора;

в) уложить и выверить на фундаментной раме *1* рельсы *2*;

г) прикрепить к бочке ротора защитные рейки и поверх них привязать шпагатом картон толщиной не менее 2 мм; присоединить к ротору тележки *3* и *4*, обернув места их установки на роторе картоном.

Для заводки ротор стропят за «бочку» с подкладкой под тросы войлока и досок, вывешивают ротор в горизонтальном положении и заводят в статор до упора тросов в торец статора и опускают на тележки (положение *I*). Далее снимают с бочки ротора всю защиту и, действуя рычагами *7*, вставляемыми в отверстия роликов тележки *3*, заводят ротор в статор до положения *III*, при котором можно подвести стропы под полумуфту. Продвинув ротор в положение *II* и оперев на подкладку *6*, освобождают тележку *4*.

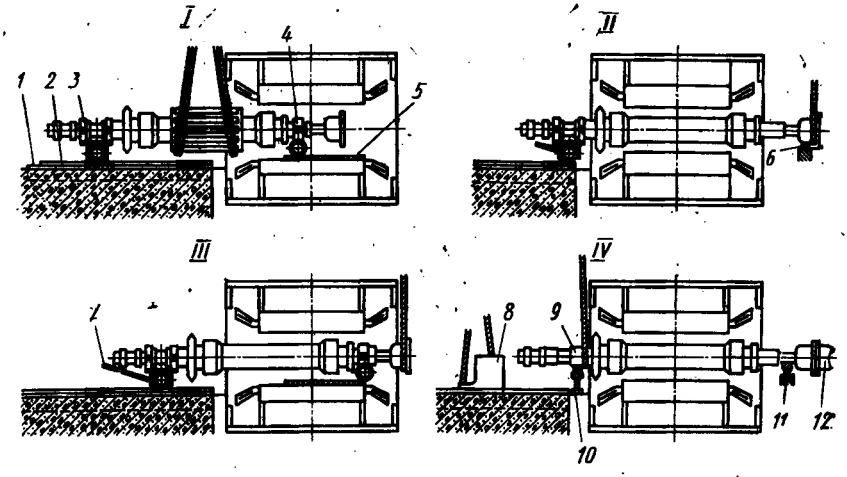


Рис. 201. Схема заводки ротора генератора в статор

Затем устанавливают на место нижнюю половину вкладыша генератора, приподнимают ротор, удаляют подкладки *6* и опускают ротор на вкладыш *11* (положение *IV*). Приподняв задний конец ротора, снимают тележку *3*, удаляют рельсы *2* и лист *5* и опирают ротор на балку *10* через подкладки *9*. Устанавливают на место корпус заднего подшипника *8* и нижнюю половину вкладыша. Приподнимают ротор, убирают подкладки *9*, опускают ротор на вкладыш. Затем центруют ротор генератора по муфте *12* ротора турбины.

Глава XXVII. ПУСКО-НАЛАДОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТУРБИН

1. Подготовительные работы перед пуском

До начала работ по пуску турбины на электростанции должны быть закончены все строительные работы, которые могут мешать испытанию и наладке турбины, тщательно очищено помещение машинного зала от мусора, неиспользованного оборудо-

вания и материалов; должны быть закончены также работы по оборудованию зала основным и аварийным освещением, установлены контрольно-измерительные приборы и обеспечено выполнение всех требований охраны труда и техники безопасности.

Перед пуском следует проверить соответствие собранных трубопроводов принципиальным и монтажным схемам и чертежам; надежность работы механизмов открытия и закрытия клапанов и задвижек; наличие диафрагм требуемых сечений в маслопроводах и паропроводах и отсутствие различных заглушек, установленных временно в процессе монтажа турбинного оборудования.

Для обслуживания турбинной установки во время пусконаладочных операций должен быть подготовлен штат квалифицированного эксплуатационного персонала, разработана программа пуска смонтированной турбины, заведен «Журнал пусковых работ» для записей результатов опробования и наладки турбины.

В этот журнал записываются: время пуска и остановок; время прогрева паропровода и турбины; результаты опробования органов регулирования и защиты; замеченные неполадки и ненормальности в работе как турбины, так и всех вспомогательных устройств, другие замечания по эксплуатации новой турбины.

К предпусковым работам относятся: продувка паропроводов свежего пара; тепловая изоляция; подготовка масляной системы и настройка элементов системы регулирования; проверка плотности вакуумной системы; проверка циркуляционной, конденсатной и воздушной систем.

Продувка паропровода свежего пара предназначена для очистки паропровода от болтов, гаек, огарков электродов и других посторонних предметов, которые могли остаться в паропроводах в период их монтажа.

Для этой цели вблизи турбины (перед главным стопорным клапаном) отнимается какая-нибудь деталь: колено, задвижка или труба. К паропроводу подсоединяется временный паропровод для вывода пара в атмосферу вне машинного зала. Элементы отвода временного паропровода надо надежно закрепить от действия сил реакции струи вытекающего пара.

Перед продувкой открывают все задвижки за исключением первой, находящейся у котла; затем постепенным открытием этой задвижки пускают пар для продувки, которая продолжается 15—20 мин.

Продувку перепускных труб от стопорного клапана к ЦВД производят после продувки главного паропровода. Перед продувкой удаляют регулирующие и стопорный клапаны; вместо регулирующих клапанов к паровым коробкам подводят временные паропроводы с задвижками для вывода пара в атмосферу;

в седла устанавливают конусные пробки. Поочередно открывая задвижки, продувают все клапаны. Длительность каждой продувки также 15—20 мин.

Тепловая изоляция предназначена для защиты обслуживающего персонала от действия теплового излучения, а также для выравнивания температур ротора и цилиндра, верха и низа корпуса турбины, ввиду опасности коробления цилиндра при неравномерном его охлаждении воздухом помещения.

В турбинах низких параметров изоляция цилиндра, как правило, производилась после наладки турбины, перед ее пуском для приема рабочей нагрузки. В турбинах высоких параметров изоляция цилиндра должна быть выполнена до пуско-наладочных операций. После каждого вскрытия турбины изоляция должна быть обязательно восстановлена.

В качестве изоляционных материалов применяют асбестовую ткань, асбестовую обмазку, асбестовые матрицы, совелитовые плиты, диатомовый кирпич, вермикулит и другие материалы малой теплопроводности. При выборе материалов для тепловой изоляции надо учитывать, чтобы они ни в сухом, ни в сыром состоянии не оказывали химического воздействия на изолируемые поверхности. При смешивании отдельных компонентов нельзя применять воду, загрязненную солями.

Толщина слоя изоляции берется из такого расчета, чтобы при температуре окружающего воздуха 20° С температура наружной поверхности изоляции не превышала 50° С. Для обеспечения этих условий толщина слоя изоляции достигает 150 мм. Изоляцию покрывают металлической обшивкой.

Выхлопные части турбинной установки изоляцией не покрываются, так как температура их наружных стенок и без применения изоляции находится в указанных выше пределах.

Масляная система снабжает маслом подшипники турбоагрегата и систему регулирования. Она состоит из масляного бака, маслоохладителей, масляных насосов и маслопроводов. Эта система имеет ряд вспомогательных устройств: указатели уровня масла, фильтры, реле давления, инжекторы, сливной, обратные и редукционный клапаны и др.

В системе применяется масло турбинное марки 22п. Системы смазки и регулирования турбины 300 МВт ЛМЗ и ХТГЗ работают на различных жидкостях. У турбин ЛМЗ в системе регулирования применяется негорючая жидкость «Иввиоль-2», у турбин ХТГЗ — конденсат.

Подготовка масляной системы состоит из заливки масла в бак, проверки вспомогательных масляных насосов и прокачки масла для очистки масляной системы. Перед заливкой масла масляный бак тщательно очищают.

Заливку рекомендуется производить с применением центрифуги или фильтр-пресса, а если они отсутствуют, то через сетку с числом ячеек 800—1200 на 1 см^2 и марлю, расположенную на

этой сетке в три-четыре слоя. Уровень залитого в бак масла должен не доходить до крышки на 100—140 мм.

При заливке проверяют правильность действия указателя уровня масла.

Прокачку системы ведут вспомогательным масляным насосом. По мере заполнения системы масло уходит из бака и его доливают. При полностью заполненной системе уровень масла должен не доходить до крышки на 140 мм.

Для ускорения промывки масло подогревают до 50—55° С. Вначале прокачку ведут с отключенными подшипниками. Затем, через 10—12 ч, к прокачиваемой масляной системе подключают и вкладыши подшипников.

При прокачке масло очищается центрифугой. В зависимости от степени очистки трубопроводов при монтаже, очистка масляной системы в процессе прокачки может продолжаться от 24 ч до нескольких суток. О чистоте системы судят по наличию загрязнений на сетках фильтров. Прокачку масла можно закончить, когда после контрольной 3—4-часовой прокачки на сетках не будет оставаться твердых частиц, ворса и следов других загрязнений.

Гидравлическое испытание систем регулирования и смазки производят, создавая масляным насосом давление в 1,5 раза выше рабочего при соответствующей регулировке редукционного и сливного клапанов. При этом испытании проверяют также работу органов регулирования и защиты.

Проверка плотности вакуумной системы производится наливом воды в конденсатор. Под лапы конденсатора при этом подводят жесткие опоры, чтобы не передать вес воды на выхлопной патрубок турбины.

Проверка циркуляционной, конденсатной и воздушной систем. Конденсатный насос проверяют путем перекачки воды из конденсатора через рециркуляционную систему обратно в конденсатор. При этом проверяют потребляемую мощность, вибрацию подшипников и корпуса, температуру подшипников, работу сальников.

Амплитуда колебаний при вибрации не должна превышать 0,06 мм при частоте вращения 3000 об/мин и 0,10 мм при частоте вращения 1500 об/мин и ниже. Одновременно проверяют плотность фланцевых соединений и арматуры.

Проверку воздушной системы производят путем пуска эжектора первоначально при закрытой задвижке отсоса воздуха из конденсатора. Эжектор должен создавать разряжение порядка 98%. Затем открывают задвижку и создают разряжение в конденсаторе (его величина должна быть не менее 300 мм рт. ст.) без подачи пара на уплотнения и вновь проверяют работу конденсатного насоса. При этом проверяются потребляемая насосом мощность, величина создаваемого напора и отсутствие срывов, т. е. устойчивость работы насоса.

При наличии в системе двух насосов опробывают переход работы с одного насоса на другой. До пуска турбины каждый насос должен отработать не менее 4 ч.

Работу циркуляционных насосов проверяют аналогично проверке конденсатных насосов.

2. Пуск и нагружение турбины

Для определения порядка выполнения отдельных операций по пуску турбины следует руководствоваться заводскими инструкциями, так как пуск каждого типа турбины имеет свои характерные особенности. Однако имеются общие положения по пуску турбин, регламентирующие наиболее целесообразные методы прогрева оборудования, повышения частоты вращения роторов и нагружения турбины, основанные на большом практическом опыте и специальных исследованиях. Существо этих положений направлено на предупреждение образования при пуске опасных напряжений, перекосов и деформаций в результате неравномерного нагрева отдельных частей турбины.

Прежде всего перед пуском необходимо иметь полную уверенность в безусловной исправности и надежности всех важнейших элементов, от которых зависит сохранность агрегата, и в первую очередь устройств управления, регулирования и защиты. Поэтому перед пуском необходимо осмотреть турбину, генератор, возбудитель и вспомогательное оборудование турбоустановки и убедиться, что все оборудование полностью готово к пуску, обеспечена его необходимая чистота, убраны все посторонние предметы и проверены необходимые противопожарные мероприятия, подготовлены и правильно размещены огнетушители и ящики с песком, оборудованы посты со шлангами, поставлена под давление система пожарных водопроводов.

Пуск турбины начинается с прогрева паропровода от котельной до главных задвижек и вспомогательных механизмов. Эту операцию надо вести осторожно и медленно. Скорость повышения давления — не более 10 Н/см^2 (1 кгс/см^2) в минуту, температуры — 5° С в минуту. По достижении давления 20—30 Н/см^2 (2—3 кгс/см^2) необходимо прогревать паропровод в течение 15—20 мин, приостановив дальнейшее повышение давления.

При прогреве паропровода до главных задвижек необходимо следить, чтобы пар не попадал в неработающую турбину. Для этого открывают вентили обеспаривания на линии от стопорных задвижек до регулирующих клапанов.

Далее приводятся сокращенные выдержки из инструкции по пуску применительно в основном к турбине 100 МВт (К-100-90).

После прогрева паропровода при давлении 20—30 Н/см^2 в течение 15—20 мин дальнейший прогрев ведут, постепенно увеличивая давление по следующему режиму:

а) в интервале давлений 30—60 Н/см^2 (3—6 кгс/см^2) ско-

рость увеличения давления должна составлять 5 Н/см² (0,5 кгс/см²) в минуту;

б) в интервале давлений 60—150 Н/см² (6—15 кгс/см²) — 10 Н/см² (1 кгс/см²) в минуту;

в) в интервале давлений 150—400 Н/см² (15—40 кгс/см²) — 20 Н/см² (2 кгс/см²) в минуту;

г) в интервале давлений 400—900 Н/см² (40—90 кгс/см²) — 50 Н/см² (5 кгс/см²) в минуту.

При этом скорость повышения температуры пара не должна превышать 5° С в минуту.

Прогрев паропровода от главных запорных задвижек до регулирующих клапанов выполняется после пуска конденсационного устройства и включения валоповорота.

Для прогрева турбины необходимо:

а) закрыть вентили обеспаривания; б) открыть вентили подачи охлаждающей воды к сервомотору клапана автоматического затвора; в) открыть продувочный вентиль перепускных труб и закрыть ревизионный (после того как при помощи ревизионного вентиля будет установлено, что выходящий пар бесцветен, допускается уменьшить продувку через продувочный вентиль); г) открыть продувочные вентили паровых коробок боковых клапанов; д) открыть полностью клапан автоматического затвора (при наличии двух клапанов — открыть оба); е) открывая пусковой вентиль (пусковую задвижку) на обводной линии (трубе), поднять давление в паропроводах к регулирующим клапанам до 600—650 Н/см² (60—65 кгс/см²), следя при этом за тем, чтобы температура стенок паровой коробки автоматического запорного клапана не возрастала быстрее чем на 4° С в минуту.

Давление 600—650 Н/см² (60—65 кгс/см²) поддерживать до момента пуска. При этом вспомогательный масляный насос развивает полное давление масла, что обеспечивает безопасность пуска. Пуск турбины в ход и прогрев турбины при вращающемся роторе должны производиться в соответствии с заводской инструкцией.

Во время первых пусков ведется особо тщательное наблюдение за работой турбины. Под непрерывным наблюдением должны находиться характер шума в цилиндре, уплотнениях, подшипниках, червячной передаче, главном масляном насосе; вибрация подшипников; тепловые расширения; слив масла из подшипников и температура масла; работа масляной системы; система регулирования; регулирующие клапаны.

Во время пробных пусков ведется наладка и полное испытание системы регулирования со снятием характеристик. По всем этапам пусков и опробований составляется технический акт.

С момента пуска турбины в особом журнале должны вестись регулярные записи показаний измерительных приборов через каждые 30 минут. В журнале отмечается время начала прогрева на малой частоте вращения ротора.

Перед дальнейшим увеличением частоты вращения необходимо:

1. Проверить, что:

а) масло поступает ко всем подшипникам в достаточном количестве, температура масла не выше 40—45° С и давление масла в системах смазки и регулирования соответствуют нормальному уровню;

б) конденсационная система работает исправно и вакуум достиг 450—500 мм рт. ст.;

в) регулирующие клапаны закрыты.

Перед пуском пара на уплотнения включают валоповорот, который работает непрерывно до толчка ротора паром. В этот период масло на смазку турбины и валоповорота подается масляным электронасосом.

2. Переключить продувку перепускных труб с атмосферы на конденсатор.

3. Вращая маховик ограничителя мощности, открыть первый регулирующий клапан настолько, чтобы ротор начал вращаться с частотой 300—500 об/мин, что следует проверить ручным тахометром. Проверить, что валоповорот отключился.

4. Закрыть доступ пара в турбину вентилем на обводной линии и прослушать отсутствие задеваний движущихся частей турбины за неподвижные.

5. При нормальном звуке вращающегося ротора маховичком ограничителя мощности полностью открыть все клапаны. После этого, медленно открывая вентиль на обводной линии, установить частоту вращения 300—500 об/мин.

6. При этой частоте вращения прогреть турбину в течение 15—20 мин. Прогрев на этой частоте можно считать законченным, если в течение 10—15 мин величины удлинения цилиндра и ротора остаются неизменными.

При повышении уровня конденсата в конденсатосборнике выше нормального необходимо откачать конденсат в деаэратор и подать охлаждающую воду на маслоохладители. Температура масла после маслоохладителей должна находиться в пределах 35—40° С; в отдельных случаях она может повышаться до 45° С, но не выше.

После прогрева турбины при частоте вращения 300—500 об/мин в течение 15—20 мин и при отсутствии признаков каких-либо ненормальностей в работе всего оборудования следует приступить к повышению частоты вращения со скоростью 50 об/мин до 1300—1400 об/мин.

При этом необходимо вести тщательное наблюдение за исправностью работы масляной системы; давлением масла в демпферной камере (оно должно быть не ниже 7,5 Н/см^2 (0,75 кгс/см^2) и не более 15 Н/см^2 (1,5 кгс/см^2); вибрацией турбины и биением ротора; равномерностью теплового расширения и разностью температур в верхней и в нижней зонах цилиндра.

В зоне регулирующего колеса можно допустить различие температур не более чем на 30—35° С. В этот период времени следует поднять вакуум до нормального.

При повышении частоты вращения ротора с 1400 до 3000 об/мин необходимо соблюдать следующее:

а) на частоте 1400 об/мин держать турбину 20—30 мин;

б) повышать частоту вращения до 2400 об/мин со скоростью 100 об/мин;

в) на частоте 2300—2400 об/мин прогреть турбину в течение 30 мин;

г) ослабить пружины синхронизатора и поднять частоту вращения до момента вступления в работу регулятора скорости, т. е. до начала закрытия регулирующих клапанов;

д) постепенным вращением маховичка синхронизатора и дополнительным открытием пускового вентиля на обводной линии поднять равномерно в течение 30 мин частоту вращения ротора турбины с 2300—2400 об/мин до 3000 об/мин.

Турбина должна проработать на холостом ходу до тех пор, пока температура нижней половины не достигнет 210—220° С, но не менее 30 мин.

Таким образом, общая продолжительность прогрева турбины К-100-90 составляет 2,5—3 ч.

При достижении частоты вращения 1500—2000 об/мин можно отключить пусковой масляный турбонасос. При 2700—2750 об/мин должен вступить в работу регулятор скорости, и все регулирующие клапаны должны закрыться, кроме первого, поддерживающего холостой ход. По достижении частоты вращения ротора турбины 3000 об/мин пусковым вентилем на обводной линии доводят давление пара перед регулирующими клапанами до нормального.

Проверяют исправность механизмов клапанов автоматического затвора, после чего можно открыть главные запорные задвижки и закрыть пусковую задвижку на обводной линии.

Нагружение турбины производится постепенно со скоростью 500 кВт в минуту в течение 5—10 мин.

По достижении 1,5—3 МВт выдерживают машину при этой нагрузке, пока температура нижней половины ЦВД в зоне регулирующей ступени не достигнет 290—300° С. Затем, постепенно увеличивая нагрузку до $^1/_4$, $^1/_2$ и $^3/_4$ от нормальной, выдерживают турбину при каждой из этих нагрузок 60 мин. Повышение нагрузки до полной ведется с той же скоростью.

Подключение систем отбора энергии для теплофикационных турбин начинают при достижении электрической нагрузки не менее 15—20% от нормальной, т. е. когда возможно дать в отбор 26—30 т/ч пара.

Повышение количества пара для внешних потребителей также необходимо производить постепенно со скоростью не более 5 т в минуту.

3. Остановка турбины

Остановка турбины проводится в соответствии с заводской инструкцией.

В нормальных условиях (в неаварийных случаях) остановка турбины со снижением нагрузки должна быть произведена равномерно в течение часа. Ниже приводится примерная последовательность выполнения отдельных операций по остановке турбины.

1. Опробовать пусковой масляный турбонасос и подготовить к пуску масляный электронасос.

2. Опробовать клапан автоматического затвора.

3. По мере снижения нагрузки постепенно прикрывать главные запорные задвижки (снижение нагрузки ведется с той же скоростью, что и ее повышение).

4. При нагрузке около 10% от нормальной следует открыть пусковой вентиль на обводной линии и полностью закрыть главные запорные задвижки; отключить испарители и подогреватели; постепенно переключать конденсатный насос на рециркуляцию, для того чтобы охладители эжекторов не остались без снабжения конденсатом.

5. При снижении нагрузки регулировать подачу пара к уплотнениям. Следить, чтобы давление пара в охладителе не превышало 5 Н/см^2 (0,5 кгс/см^2), а температура 125—145° С.

6. Следить, чтобы регулирующие клапаны закрывались без заеданий.

7. После получения сигнала об отключении нагрузки расцепить рычаги автомата безопасности и закрыть пусковые задвижки (вентили) на обводной линии. Проследить за тем, чтобы клапаны автоматического затвора закрылись полностью.

8. Зарядить механизмы клапанов автоматического затвора на случай непредвиденной необходимости экстренного пуска турбины (это возможно, например, в случае порчи пускового масляного насоса).

9. По мере снижения давления масла в системе включить пусковой масляный турбо- или электронасосы. Регулировать, чтобы давление в системе смазки было нормальное.

10. Прослушивать турбину в течение периода выбега ротора.

11. При достижении частоты вращения 500—400 об/мин постепенно перекрывать поступление пара на эжекторы, чтобы к моменту полной остановки ротора вакуума уже не оставалось.

12. После полной остановки ротора отключить подачу пара к эжекторам. Отключить конденсатный насос. Отключить пар, подаваемый на уплотнения, можно только после полного снижения вакуума в конденсаторе.

13. Немедленно после остановки ротора турбины включить валоповорот. Масляный насос должен быть включен для смазки

подшипников валоповорота и подшипников турбины при вращении ротора от валоповорота.

14. Циркуляционный насос можно отключить только тогда, когда температура выхлопного патрубка турбины не будет превышать 50° С. Воду на маслоохладители включить от резервного подвода воды.

15. Открытие турбины после остановки можно начинать только после ее остывания до температуры не выше 80° С.

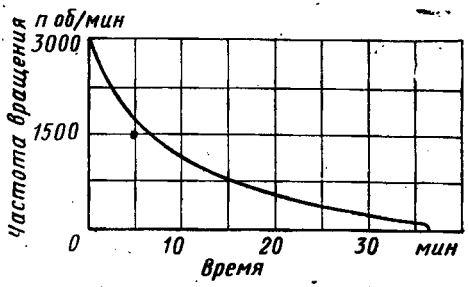


Рис. 262. Кривая нормального выбега ротора турбогенератора

Выбегом турбогенератора называется вращение ротора турбогенератора по инерции, продолжающееся от момента прекращения доступа пара в турбину до момента полной остановки ротора.

Нормальная длительность выбега должна быть установлена для каждой турбины и подлежит проверке при всех остановах турбины с занесением результатов проверки в эксплуатационный журнал. При отклонении выбега от нормального должна быть выявлена причина отклонения и приняты меры к ее устранению.

Характер кривой нормального выбега показан на рис. 262. Для снятия кривой с холостого хода, отключают пар и, пользуясь секундомером и тахометром, записывают через каждую минуту частоту вращения ротора. Полученная кривая называется кривой выбега.

За нормальную кривую выбега данной турбины принимают кривую, снятую после первых 200—300 ч его работы, т. е. когда агрегат находится еще в полном порядке, а детали уже приработались.

Во время снятия кривой выбега величина разряжения в конденсаторе сохраняется постоянной. Время выбега при одном и том же разряжении позволяет судить о состоянии подшипников и плотности закрытия клапанов. Если при последующих остановках кривая выбега будет удлиняться, то это покажет на неплотность закрытия клапанов. Если кривая будет укорачиваться, то это обнаружит повышенное торможение, которое может образоваться вследствие нарушений в работе подшипников или механических дефектов, например задевания подвижных элементов турбины за неподвижные.

Нормальное время выбега у малых турбин равно 20—25 мин; у больших — от 25 до 35 мин и выше; у турбин с противодавлением — от 12 до 25 мин; у малых турбин с редуктором — от 8 до 12 мин.

4. Сдача турбинной установки в эксплуатацию

Окончание монтажа и готовность турбинной установки к сдаче в эксплуатацию устанавливается пусковой комиссией после приемки всех частей установки и комплексного опробования установки в соответствии с действующими положениями и инструкциями.

Положительным результатом (окончанием) комплексного опробования считается нормальная непрерывная работа всего агрегата под полной нагрузкой в течение не менее трех суток.

До сдачи турбины в эксплуатацию должны быть получены разрешения на эксплуатацию данной энергоустановки от Госгортехнадзора, Государственной санитарной и пожарной инспекций и Технической инспекции профсоюза.

Кроме того, должны быть подготовлены необходимые в процессе эксплуатации инструменты, приспособления и запасные части; инструкции по эксплуатации оборудования и необходимые технологические схемы; проведена подготовка обслуживающего установку персонала и произведена проверка необходимых знаний у всех лиц, связанных с эксплуатацией установки, налажено обслуживание и подготовлена необходимая техническая документация.

5. Основы пуска газотурбинной установки

При рассмотрении вопросов пуска газотурбинных установок после их монтажа предполагается, что до начала пуска уже выполнены все подготовительные работы согласно общим положениям о порядке проведения предпусковых работ. Кроме того, пуск в работу и подготовка к пуску каждой газотурбинной установки должны проводиться обязательно с точным соблюдением всех специальных указаний, приведенных в заводских инструкциях.

Пуск газотурбинного двигателя существенно отличается от пуска паротурбинной установки простотой и экономичностью. Быстрота пуска и простота обслуживания газотурбинных двигателей благоприятствует широкому внедрению их в энергетику в качестве пиковых и резервных агрегатов. Пуск газотурбинных установок более просто автоматизировать, однако газовые турбины не могут быть запущены самостоятельно и требуют применения специальных пусковых двигателей.

В качестве пусковых двигателей используются двигатели внутреннего сгорания; турбодетандеры, т. е. турбины, работающие за счет располагаемого перепада давлений (например, на газоперекачивающих станциях); паровые турбины (на электростанциях); электрические двигатели; иногда баллоны с сжатым воздухом (для запуска турбин малой мощности).

До момента зажигания топлива в камере сгорания основной газотурбинной установки пусковой двигатель поднимает частоту вращения ротора газовой турбины и компрессора в холодном состоянии до величины, при которой создаются необходимые давление и поток воздуха, обеспечивающие устойчивое горение топлива в камере сгорания основной турбины. Обычно это достигается при 20—25% номинальной частоты вращения ротора газотурбинного агрегата.

После зажигания топлива основная турбина начинает сама совершать некоторую работу, которая параллельно с работой пускового двигателя затрачивается на преодоление сопротивлений вращению и дальнейший подъем частоты вращения агрегата. Пусковой двигатель продолжает работать до тех пор, пока основная турбина не будет в состоянии принять на себя полностью всю нагрузку холостого хода. Этот момент обычно совпадает с моментом вступления в работу главного масляного насоса.

В двухвальных газотурбинных установках вал низкого давления раскручивается потоком воздуха или газа, создаваемого машинами вала высокого давления.

С точки зрения надежности к пуску газовой турбины предъявляются те же требования, что и к пуску паровой турбины, а именно: не допустить задевания вращающихся частей турбины за неподвижные; не допустить чрезмерные термические напряжения в отдельных деталях, вызываемые неодинаковым их нагревом.

Выполнение указанных требований в газовых турбинах достигается значительно проще, чем в паровых. Это происходит, во-первых, потому, что газовая турбина пускается при температуре рабочего газа более низкой, чем номинальная, что исключает необходимость добиваться установившегося состояния прогрева частей турбины, и, во-вторых, потому, что невысокое давление рабочей среды в газовых турбинах позволяет выполнить конструктивно стенки и фланцы корпуса значительно более тонкими и при этом с меньшей разницей в толщине их, чем в паровой турбине, создавая тем самым благоприятные условия для равномерного прогрева всех элементов корпуса. Соотношение масс корпуса и ротора в газовых турбинах тоже более благоприятное.

Именно эти особенности конструкции и работы газовых турбин позволяют успешно решать вопросы автоматизации пуска и управления. Так, например, в газовой турбине ГТ-6-750 при нажатии кнопки «Пуск» на пульте управления последовательно и автоматически выполняются все пусковые операции, в частности включение пусковых маслонасосов и эксгаустера (специального отсасывающего устройства, поддерживающего во внутренней полости маслобака разряжение с целью избежания выхода паров масла в машинный зал при работе агрегата), включение пускового двигателя, подача топлива в камеру сго-

рания, зажигание топлива, выключение пускового двигателя и другие операции, обеспечивающие запуск турбины.

Предусмотренные конструкцией турбины защитные устройства автоматически останавливают турбину путем прекращения подачи топлива к камерам сгорания и открытия сбросных клапанов для сброса воздуха после компрессора, в случаях: превышения роторами допустимого числа оборотов; недопустимого осевого сдвига роторов; превышения максимально допустимой температуры газа перед ТВД; затухания факела в камере сгорания; понижения давления масла на смазку; недопустимого повышения температуры вкладышей и масла на сливе из колодок упорных подшипников; повышения вибрации подшипников; недопустимого понижения уровня в маслобаке и при других неполадках.

Нормальный останов агрегата (т. е. не вынужденный непосредственной опасностью для машины), сопровождающийся постепенным снижением нагрузки путем плавного уменьшения подачи топливного газа, также осуществляется автоматически.

Для производства нормального останова также следует нажать лишь кнопку «Останов». При этом начинает вращаться моторчик регулятора скорости, прикрывая регулирующий клапан; снижаются обороты турбины; включаются пусковые насосы.

При падении давления воздуха за компрессором до 10 Н/см^2 (1 кгс/см^2) происходит закрытие органов регулирования, перестановка кранов в положение, соответствующее предпусковым условиям. При частоте вращения турбины высокого давления около 400 об/мин включается турбодетандер (пусковой двигатель), который вращает ротор турбины в течение 1—2 ч с целью равномерного охлаждения турбины до определенной температуры. Останов маслонасоса произойдет через 1 ч 30 мин после остановки турбодетандера, когда температура турбины снизится до уровня, безопасного для вкладышей среднего подшипника.

Инструкция по обслуживанию газотурбинной установки содержит перечни мероприятий, которые должны быть выполнены обслуживающим персоналом по ликвидации неполадок, вызвавших срабатывание тех или иных органов защиты. Она содержит также описание мероприятий по контролю состояния и нормальной работы самих органов защиты.

Контроль органов защиты осуществляется перед каждым пуском турбоагрегата. Прежде чем пустить основную турбину, обслуживающий персонал обязан проверить исправность действия органов защиты. Эта проверка выполняется в соответствии с особой инструкцией. Только после тщательной проверки исправности работы органов защиты можно нажимать на кнопку «Пуск», приводящую в действие уже всю автоматическую систему запуска газотурбинной установки.

	Карта краткого технологического процесса	Изделие	Наименование детали	№ чертежа

Материал		Заготовка		Время на 1 деталь в мин		
Марка	Твердость	Род	Размер	Станочное	Ручное	Полное

Цех/отдел № операции	Содержание операции	Оборудование наименование модель инв. №	Приспособления и инструмент			Разряд работы	Штучное время в мин
			Наименование	Размер	Индекс		

Литер изменения	Количество	№ документа	Подпись	Дата	Литер изменения	Количество	№ документа	Подпись	Дата

Технолог		Нач. цеха		Лист №
Нормировщик		Гл. технолог		
Нач. технологического бюро				Листов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Завод, отдел главного технолога	Операционная карта механической обработки	Тип машины	Наименование детали	Ступень турбины	№ операции	№ чертежа		
	Наименование операции и эскиз обработки							
Оборудование		Измерительный инструмент				Эскиз клеймения		
		Режим работы	Частота вращения в об/мин	Изменения				
			Подача в мм/мин	№ извещения	Литер	Подпись	Дата	
			Одновременно обрабатываются детали					
Приспособление		Норма времени	Разряд работы					
Инструмент	Режущий		Норма времени					
	Вспомогательный		Расценка					
			Выработка в смену					
Составил	Дата	Нач. тех. бюро	Дата	Нормировщик	Дата			

Завод		Операционно-нормировочная карта механической обработки	Изделие	Наименование детали	№ чертежа
Цех	Отдел		Наименование операции		№ операции

Разряд работ	Норма времени на операцию в мин					Норма выработки в смену в шт.	Количество обслуживаемых станков	Расценка в руб.		Оборудование		
	подготовительно-заключительное на партию	основное	вспомогательное	дополнительное	штучное			за подготовительное заключительное время на партию	за штучное время	Наименование	Модель	Инвентарный №

№ перехода	Наименование перехода	№ обрабатываемой поверхности	Диаметр, ширина, длина	Расчетная длина	Глубина резания	Число проходов	Подача	Число оборотов или двойных ходов	Скорость резания	Основное время в мин	Элементы вспомогательного времени в мин						Итого на переход
											Время на установку детали и поворот приспособления		Время, связанное с переходом		Время на измерения		
											№ таблицы		№ таблицы		№ таблицы		
											№ позиции	время	№ позиции	время	№ позиции	время	

Нормировал	Проверил	Утвердил	Лист №
			Листов

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Операционная карта сборки	Изделие	Наименование узла	№ чертежа

№ операции	№ перехода	Содержание операции, перехода	Входящие детали		Оборудование, приспособления, инструменты		Профессия и разряд	Количество рабочих	Норма времени в мин
			№ чертежа	Количество	Наименование	Индекс			

										Технолог	Нормировщик	Нач. технического бюро	Лист №
Литер изменения	Количество	№ документа	Подпись	Дата	Литер изменения	Количество	№ документа	Подпись	Дата				Листов

	Типовая операционная карта сборочно-сварочных работ	Изделие	Наименование детали	№ чертежа

	№ чертежа	Маршрут	Количество на машину		Масса деталей		Материал	
Отдел сварки			шт.		кг			

№ операции	Наименование операции	Оборудование	Оснастка	Технологические указания

											Технолог		Нач. цеха		Лист №
											Нормировщик				
Литер изменения	Количество	№ документа	Подпись	Дата	Литер изменения	Количество	№ документа	Подпись	Дата		Нач. технического бюро		Нач. отдела сварки		Листов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абалаков Б. В., Банник В. П., Резников В. И.** Монтаж паровых турбин и вспомогательного оборудования. М.— Л., «Энергия», 1966, 312 с.

2. **Аугерт О. Г.** Состояние производства турбинных лопаток на заводах отрасли и мероприятия по его усовершенствованию. Сб. «Совершенствование производства лопаток в турбостроении». М., НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1969, с. 3—15.

3. **Балакшин Б. С.** Основы технологии машиностроения. М., «Машиностроение», 1969, 560 с.

4. **Бауман Н. Я., Свечков И. Н., Яковлев М. И.** Технология турбостроения. М.,— Свердловск, Машгиз, 1960, 552 с.

5. **Бауман Н. Я.** Совершенствование технологичности конструкций и технологии изготовления лопаток паровых турбин. Труды Уральского политехнического института им. С. М. Кирова. Сб. 166, изд. УПИ. Свердловск, 1967, с. 5—12.

6. **Брановский М. А., Сивков А. П.** Балансировка роторов турбогенераторов. М.— Л., «Энергия», 1966, 143 с.

7. **Бушуев М. Н.** Технология производства турбин. М.— Л., «Машиностроение», 1966, 416 с.

8. **Гурский А. Н., Куперштох С. Н., Егоров В. Н., Филиппов А. М.** Усовершенствование технологии сборки паровых турбин. Сб. ЛМЗ № 7 «Некоторые вопросы технологии производства турбин». М.— Л., Машгиз, 1960, с. 85—98.

9. **Долицкий Н. И.** Технико-экономические показатели производства стационарных паровых турбин. М.— Л., Машгиз, 1964, 302 с.

10. **Жирицкий Г. С.** Конструкция и расчет на прочность деталей паровых турбин. М.— Л., ГЭИ, 1960, 311 с.

11. **Кован В. М., Корсаков В. С., Косилова А. Г.** и др. Основы технологии машиностроения. Под ред. В. С. Корсакова. М., «Машиностроение», 1965, 492 с.

12. **Куриц С. Я.** Повышение эффективности монтажа паровых и газовых турбин. М., «Энергия», 1967.

13. **Лобанов И. И.** Электрофизические и электрохимические методы обработки. Сб. «Турбомоторного завода «Опыт создания турбин и дизелей». Свердловск, Средне-Уральское книжное издательство, 1969, с. 185—195.

14. **Молочек В. А.** Ремонт паровых турбин. М., «Энергия», 1968, 376 с.

15. **Писаренко В. С.** Технология турбостроения и перспективы ее развития.— «Энергомашиностроение», 1970, № 4, с. 34—37.

16. **Полвека** на службе электрификации. Под ред. Чернышева П. С. М.— Л., «Машиностроение», 1967, 412 с.

17. **Попов А. И., Речистер В. Д., Юдовин И. Б., Ващилин В. Г.** Технология судового турбостроения. Л., «Судостроение», 1966, 372 с.

18. **Технологичность** конструкций. Под ред. С. Д. Ананьева и В. П. Купревича. М., «Машиностроение», 1969, 423 с.

19. **Усовершенствование** производства турбинных лопаток. Сб. ВПТИ Энергомаша под ред. Б. А. Ильичева. М.— Л., Машгиз, 1956.

20. **Энергетическое** машиностроение 1917—1967 гг. Под общей ред. П. О. Сирого. М.— Л., «Машиностроение»., 1967, 230 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

Глава I. Основные понятия и определения 12

1. Производственный и технологический процессы 12
2. Производственная структура машиностроительного завода . . 13
3. Основные задачи подготовки производства на машиностроительном заводе 14
4. Сроки подготовки производства 17
5. Технологическая документация 20
6. Цеховые органы подготовки производства 22
7. Основные типы производства 23
8. Общая характеристика турбинного производства 24
9. Станочный парк турбинных заводов 25

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Глава II. Структура технологических процессов 27

1. Структура изделий и классификация деталей 27
2. Элементы технологических процессов 30

Глава III. Основы разработки технологических процессов . . . 32

1. Изучение конструкции объекта 32
2. Последовательность разработки технологических процессов изготовления машины 33
3. Общие принципы разработки технологических процессов механической обработки 34
4. Последовательность обработки 36
5. Выбор видов обработки 38
6. Припуски на механическую обработку 39
7. Выбор заготовок 41
8. Понятие о технологической дисциплине 44

Глава IV. Типизация технологических процессов 45

Глава V. Основные принципы обеспечения точности механической обработки деталей 48

1. Точность обработки 48
2. Основы базирования деталей в процессе их обработки . . . 50

Глава VI. **Технико-экономические вопросы производства** 53

1. Нормирование и методы повышения производительности труда . 53
2. Себестоимость машины и резервы ее снижения 56
3. Технологичность конструкции 57

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ РОТОРОВ ТУРБИН

Глава VII. **Общие сведения о роторах турбин** 59

Глава VIII. **Рабочие и направляющие лопатки** 63

1. Назначение лопаток и условия их работы 63
2. Материалы, применяемые для изготовления лопаток 63
3. Типовые конструкции лопаток 65
4. Основные требования к механической обработке лопаток . . . 73
5. Технологичность конструкций лопаток 77
6. Классификация и типизация лопаток 79
7. Типовые технологические процессы обработки лопаток различных конструкций 80
8. Виды заготовок и их влияние на технологические процессы обработки лопаток 104
9. Выбор и подготовка основных баз 106
10. Типовые операции. Оборудование и оснащение лопаточного производства 109
11. Электрофизические методы обработки лопаток 136
12. Обработка профильных частей длинных рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин 141
13. Обработка головок, сверление, шлифование, контроль лопаток . 149
14. Перспективы развития технологии лопаточного производства . . 152
15. Облопачивание дисков и роторов турбин 152

Глава IX. **Диски турбин** 168

1. Назначение и условия работы 168
2. Конструкции дисков и их технологичность 169
3. Применяемые материалы, виды заготовок и их испытания . . 171
4. Основные технические требования, предъявляемые к механической обработке дисков 175
5. Типовые технологические процессы механической обработки дисков 176
6. Статическая балансировка 187
7. Автофритирование турбинных дисков 190

Глава X. **Валы. Цельнокованые и сварные роторы** 192

1. Назначение и условия работы 192
2. Применяемые материалы и виды заготовок 192
3. Основные технические требования к механической обработке валов и цельнокованых роторов 197
4. Типовые технологические процессы механической обработки . 198
5. Изготовление сварных роторов 210
6. Сборка роторов 211
7. Динамическая балансировка роторов 223

Глава XI. **Соединительные муфты** 231

Глава XII. **Гребенчатые уплотнительные втулки** 235

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ОБРАБОТКА КРУПНЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАТОРА

Глава XIII. **Общие сведения о статорах турбин, назначение и условия их работы** 239

Глава XIV. **Корпусы цилиндров турбин** 240

1. Особенности конструкции и технологичность корпусов 240
2. Материалы для корпусов турбин и виды заготовок 243
3. Основные технические требования к механической обработке корпусов 246
4. Типовые конструкции корпусов и технологические схемы их обработки 248
5. Выбор баз для обработки и измерений 256
6. Предварительная обработка корпусов 257
7. Окончательная механическая обработка корпусов 263
8. Чистовое растачивание корпусов на расточных станках . . . 270
9. Специальные способы растачивания корпусов цилиндров . . . 278
10. Растачивание корпусов на токарно-карусельных станках . . . 281
11. Особенности обработки сварных корпусов паровых и газовых турбин 285
12. Гидравлические испытания корпусов трубин 288

Глава XV. **Подшипники турбин** 292

1. Вкладыши опорных и опорно-упорных подшипников 292
2. Вкладыши гребенчатых и сегментных упорных подшипников . . 296
3. Заливка вкладышей баббитом 299
4. Шаровые обоймы опорно-упорных вкладышей 300
5. Корпусы подшипников 303

Глава XVI. **Диафрагмы** 304

1. Назначение, условия работы и применяемые материалы . . . 304
2. Требования к механической обработке диафрагм 308
3. Типовые технологические процессы обработки сварных диафрагм . 308
4. Обработка литых диафрагм 317
5. Типовой технологический процесс механической обработки литых диафрагм 318
6. Особенности обработки диафрагм с косыми разъемами . . . 321
7. Испытание диафрагм на прогиб 324

Глава XVII. **Сегменты сопел паровых турбин** 326

Глава XVIII. **Детали уплотнений** 328

Глава XIX. **Обработка основных деталей и сборка зубчатых турбинных редукторов** 336

1. Обработка зубчатых колес редукторов турбин 336
2. Обработка корпусов редукторов 340
3. Сборка и обкатка редукторов 344

Глава XX. **Сварочно-заготовительные операции** 349

Глава XXI. **Инструментальное производство** 352

Глава XXII. **Изготовление пружин** 359

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ

СБОРКА И ИСПЫТАНИЕ ТУРБИН НА ЗАВОДЕ

Глава XXIII. **Общие положения технологии сборки машин** 363

1. Основные понятия и определения 363
2. Технологичность конструкции в отношении сборки 367
3. Слесарные и пригоночные операции 370
4. Пути повышения производительности сборки 371
5. Организация сборки турбин 372
6. Оборудование сборочного цеха 373
7. Основы разработки технологического процесса сборки . . . 373

Глава XXIV. **Общая сборка турбин** 376

1. Задачи общей сборки турбины и предъявляемые к ней требования 376
2. Конструкция стендов для сборки и испытания турбин 377
3. Подготовка стенда к сборке турбины 378
4. Центровка корпусов и роторов турбин 380
5. Центровка и пригонка обойм и диафрагм в цилиндрах . . . 397
6. Центровка опорных подшипников 400
7. Сборка статора с ротором и составление паспорта зазоров проточной части турбины 402
8. Сборка упорного подшипника 405
9. Сборка уплотнений 407
10. Подготовка к закрытию и закрытие турбины под испытание . . 408
11. Испытание турбины на заводском стенде 410

РАЗДЕЛ ШЕСТОЙ

МОНТАЖ ТУРБИН

Глава XXV. **Общие вопросы монтажа паровых и газовых турбин** . 413

Глава XXVI. **Основные работы по монтажу турбин** 423

1. Подготовка фундамента к монтажу 423
2. Сборка и монтаж конденсатора 428
3. Монтаж цилиндров турбин 431
4. Основные измерительные приборы, применяемые при монтаже . 432
5. Установка и выверка фундаментных рам 434
6. Установка и выверка нижних половин ЦНД, ЦВД и корпусов подшипников 438
7. Установка постоянных подкладок 439
8. Подливка фундаментных рам 440
9. Краткие сведения о процессе монтажа генератора 441

Глава XXVII. **Пуско-наладочные испытания турбин** 443

1. Подготовительные работы перед пуском 443
2. Пуск и нагружение турбины 446
3. Остановка турбины 450
4. Сдача турбинной установки в эксплуатацию 452
5. Основы пуска газотурбинной установки 452

Приложения 455

Список литературы 460